

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**MICRO-SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS ATÍPICOS: EL CASO DE  
LAS MOTO-TAXIS EN VILLA MARÍA DEL TRIUNFO**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero civil**, que presentan los bachilleres:

**CESAR OSWALDO LAZO CASTRO**

**ARTURO ARAUJO BARRIENTOS**

**Asesor: Ing. Félix Israel Cabrera Vega**

**Lima, marzo de 2017**



Queremos dedicar esta tesis a nuestros padres por todo su apoyo incondicional, su confianza, consejos y enseñanzas a lo largo de nuestra vida. Al ing. Félix Cabrera por su guía profesional en este proceso y a la ing. Evelyn Pérez por su aporte directo a esta investigación con el modelo 3D de la moto-taxi.

## RESUMEN EJECUTIVO

El presente proyecto desarrollado como tema de tesis introducirá los parámetros mecánicos de un vehículo atípico como las moto-taxis, ya que el software a emplear no contiene las característica de este tipo de vehículos. Para poder encontrar estos valores, es necesario una serie de pasos previos que se mencionan a continuación. El estudio comprende la simulación de una intersección no semaforizada y la incorporación de los parámetros físicos de las moto-taxis. El área de estudio es una intersección ubicada en el distrito de Villa María del Triunfo, conformada por una vía principal con 2 carriles y una vía secundaria de dos sentidos (un carril en cada sentido). Se eligió esta intersección como zona de estudio debido a que cuenta con una amplia cantidad de moto-taxis a lo largo del día.

La micro-simulación se realizó mediante el empleo del software Vissim 8.0, el cual contiene parámetros físicos de una serie de vehículos predeterminados. El cálculo de estos perfiles es el núcleo del presente estudio, que han sido representados mediante la simulación de la intersección elegida. La metodología empleada para la micro-simulación fue la proporcionada por la Federation Highway Administration (2004). En el desarrollo del modelo se incluyeron visualizaciones bidimensionales y tridimensionales, que fueron utilizados para la calibración y validación. Además, se añadieron las características geométricas y el comportamiento de manejo de los conductores propios de la zona.

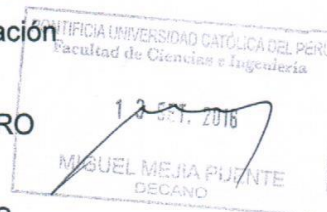
Para obtener los datos de velocidad deseada y velocidad máxima se realizaron 40 mediciones a diferentes vehículos. De esta manera se obtienen suficientes datos que reflejen el rango de velocidades a las que viaja este tipo de vehículos. Luego, se elaboró una curva de frecuencias acumuladas que es ingresada al software. Así mismo, para obtener los datos de aceleración se empleó un GPS/Timer en diferentes moto-taxis para calcular la aceleración máxima que estas otorgaban en una distancia máxima de 400 metros.

Con estos valores se procede a simular con la finalidad de poder calibrar y validar el modelo para obtener un sustento claro de que los parámetros obtenidos son aplicables en el software VISSIM. Se utilizó la prueba de Randomization Test mediante el uso de la herramienta Statkey, con la que se llegó a calibrar y validar el modelo con un grado de confianza del 95%. Del modelo se obtuvieron otras medidas como colas, tiempos de viaje y velocidades promedio en la red.

Finalmente, de los resultados obtenidos del proyecto, se puede decir que se obtuvo un comportamiento mecánico de las moto-taxis similar al de los automóviles. Además, al ingresar estos datos en el software, se pudo reflejar el hecho que más de una moto-taxi ocupe el mismo tramo de vía a la vez.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Título : "Micro-simulación de vehículos atípicos: el caso de las moto-taxis en Villa María del Triunfo".  
Área : Movilidad y Transporte - Investigación  
Asesor : Ing. Felix Israel Cabrera Vega  
Alumno : CESAR OSWALDO LAZO CASTRO  
Código : 2010.0814.412  
Alumno : ARTURO ARAUJO BARRIENTOS  
Código : 2010.1859.412  
Tema N° : # 52  
Fecha : Lima, 12 setiembre del 2016



INTRODUCCIÓN

Los estudios que se desarrollan para analizar la circulación vehicular abarcan modelos de tráfico de diversa escala, siendo uno de los más empleados la micro-simulación. Sin embargo, esta herramienta, creada en países desarrollados, no incluye a las moto-taxis como un tipo de vehículo.

Por ello, en este proyecto se realiza una investigación con la finalidad de determinar las características geométricas y de operación de las moto-taxis. Con esto, se podría micro simular zonas de Lima donde la presencia de moto-taxis es predominante. Finalmente, se empleará el software VISSIM 8.0 para analizar una zona regulada por prioridad de paso, en el distrito de Villa María del Triunfo.

OBJETIVOS

Objetivo general

El objetivo general del proyecto es representar, mediante el software VISSIM 8.0, el comportamiento de flujos vehiculares que incluyen vehículos atípicos como las moto-taxis.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos del proyecto se enfocan en conocer las características de la circulación vehicular en una zona de estudio donde la mayoría de vehículos son moto-taxis. Asimismo, analizar las características de operación de las moto-taxis (velocidad, aceleración, desaceleración, etc.). También, comparar las características de operación de los moto-taxis con las de otros vehículos convencionales. Finalmente, crear un modelo de tráfico con el software Vissim 8.



## HIPÓTESIS

Al incluirse en un modelo de micro simulación las características de operación de las moto-taxis, los resultados varían significativamente en comparación a cuando se les considera como automóviles. Además, los sub modelos de Wiedemann y de comportamiento lateral son quienes afectan principalmente el desplazamiento de las moto-taxis.

## PROGRAMA DE TRABAJO

El desarrollo de la tesis considerará los siguientes temas:

- Planteamiento del problema, objetivos e hipótesis de la investigación
- Revisión de la literatura - marco teórico: modelos de intersecciones no semaforizadas, parámetros de eficiencia, fundamentos de la micro-simulación, moto-taxis.
- Metodología de la investigación.
- Resultados.
- Conclusiones y recomendaciones.

## METODOLOGÍA

La recolección y análisis de la información se desarrollará en 6 etapas: la recolección de los datos de campo mediante técnicas manuales y filmaciones; la extracción de la información de los videos en forma manual; la construcción de la red en VISSIM 8; la calibración y validación del modelo mediante pruebas no paramétricas y un nivel de confianza del 95%; las corridas del modelo con los diferentes valores de los parámetros de Wiedemann y el análisis estadístico de los resultados.

## REVISIONES

### Primera Revisión:

- Objetivo general y objetivos específicos.
- Hipótesis de la investigación.
- Marco teórico (revisión de la literatura).

### Segunda Revisión

- Metodología del trabajo.
- Recolección de datos de campo.

### Tercera Revisión:

- Procesamiento y análisis de la información de campo.
- Conclusiones y recomendaciones.

## NOTA

Extensión máxima: 100 páginas.



VB° .....  
Dr. Rafael Aguilar  
Director de Investigación

## ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABLAS .....	viii
CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN .....	1
1.1.        Objetivo general y objetivos específicos .....	2
1.1.1.    Objetivo general.....	2
1.1.2.    Objetivos Específicos. ....	2
1.2.        Hipótesis .....	2
1.3.        Limitaciones .....	2
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1.        Modelación de intersecciones no semaforizadas .....	3
2.1.1.    Modelos de análisis de la capacidad .....	3
2.1.1.1.  Modelo de aceptación de brecha.....	3
2.1.1.2.  Modelo de regresión lineal .....	5
2.1.2.    Parámetros de eficiencia .....	7
2.1.2.1.  Demoras .....	7
2.1.2.2.  Colas .....	7
2.1.2.3.  Detenciones.....	8
2.1.3.    Simulación .....	9
2.1.3.1.  Simulación de tráfico vehicular .....	10
2.1.3.2.  Micro-simulación.....	11
2.1.3.2.1.  Características de la Micro-simulación.....	12
2.1.3.2.2.  Teoría de Seguimiento Vehicular .....	19
2.1.3.2.3.  Modelo de Wiedemann .....	23
2.1.3.2.4.  Teoría de Adelantamiento o de Cambio de Carril .....	25
2.1.3.2.5.  Calibración.....	28
2.2.        Moto-taxis.....	31
2.2.1.    Características generales.....	32
2.2.2.    Características técnicas .....	34
CAPITULO 3: METODOLOGÍA .....	36
CAPITULO 4: MODELACIÓN DE MOTO-TAXIS.....	40
4.1.        Datos recolectados .....	40
4.1.1.    Volumen de vehículos en la intersección.....	40

4.1.2.	Aceleración máxima y deseada.....	42
4.1.3.	Desaceleración máxima .....	44
4.1.4.	Histograma de Velocidades .....	45
4.2.	Modelo base.....	46
4.2.1.	Elaboración de la intersección .....	46
4.2.2.	Datos de entrada.....	48
4.2.3.	Elección de Ruta .....	49
4.2.4.	Áreas de Conflicto .....	51
4.2.5.	Comportamiento de la moto-taxi .....	51
4.2.6.	Velocidades de giro .....	54
4.2.7.	Comportamiento de los conductores.....	56
4.2.8.	Parámetros de simulación .....	58
4.2.9.	Número de Corridas .....	59
4.3.	Revisión de errores .....	61
4.4.	Calibración.....	62
CAPITULO 5: RESULTADOS.....		67
CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		70
6.1	Conclusiones.....	70
6.2	Recomendaciones .....	71

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Jerarquía en una intersección simple regulada por prioridad de movimientos ...	5
FIGURA 2 – Tipos de colas.....	8
FIGURA 3 – Diagrama de bloques de un modelo .....	12
FIGURA 4 – Tiempo Continuo vs. Tiempo Discreto .....	13
FIGURA 5 – Generación de las características del conductor.....	17
FIGURA 6 – Nivel de confiabilidad .....	19
FIGURA 7 – Modelos de Seguimiento Vehicular .....	21
FIGURA 8 – Ejemplos de una Intersección con el Modelo de Autómatas Celulares .....	23
FIGURA 9 – Modelo de Seguimiento Vehicular.....	25
FIGURA 10 – Teoría de Adelantamiento de Carril .....	26
FIGURA 11 – Árbol de Decisiones para el Modelo de Cambio de Carril.....	27
FIGURA 12 – Cambio de carril en modelos de autómatas celulares.....	27
FIGURA 13 – Parámetro Óptimo .....	30
FIGURA 14 – Criterio de Calibración .....	31
FIGURA 15 – Dimensiones de un automóvil convencional.....	33
FIGURA 16 – Dimensiones de un moto-taxi.....	33
FIGURA 17 – Modelo antiguo de moto-taxi .....	34
FIGURA 18 – Metodología de un Proyecto de Micro-simulación .....	37
FIGURA 19 – Orden establecido a las direcciones de la intersección.....	40
FIGURA 20 – Flujograma de la intersección estudiada (veh/h).....	41
FIGURA 21 – Grafica de Aceleración Máxima .....	43
FIGURA 22 – Aceleración máxima.....	43
FIGURA 23 – Desaceleración máxima de automóvil.....	44
FIGURA 24 – Desaceleración máxima de moto-taxi .....	45
FIGURA 25 – Grafica de frecuencias acumuladas .....	45
FIGURA 26 – Intersección Av. Villa María con Jr. Progreso .....	46
FIGURA 27 – Parada de buses .....	47
FIGURA 28 – Rutas de vehículos.....	50
FIGURA 29 – Áreas de conflicto en la intersección.....	51
FIGURA 30 – Velocidad deseada para las moto-taxis .....	52
FIGURA 31 – Máxima aceleración para las moto-taxis .....	53
FIGURA 32 – Aceleración deseada para las moto-taxis .....	53
FIGURA 33 – Desaceleración máxima para las moto-taxis .....	54
FIGURA 34 – Zonas de giro.....	55
FIGURA 35 – Reductores de velocidad en vía principal.....	56

FIGURA 36 – Medición de distancia entre dos moto-taxis detenidos.....	57
FIGURA 37 – Parámetros de seguimiento vehicular para moto-taxis.....	57
FIGURA 38 – Cambio de carril para moto-taxis.....	58
FIGURA 39 – Parámetros de simulación .....	59
FIGURA 40 – Modelo 3D de las moto-taxis .....	62
FIGURA 41 – Distribución normal .....	64
FIGURA 42 – Calibración del modelo mediante StatKey.....	65
FIGURA 43 – Validación del modelo mediante StaKey .....	65
FIGURA 44 – Cuadro de velocidades y aceleraciones.....	67
FIGURA 45 – Modelo 3D del comportamiento de las moto-taxis .....	69





## LISTA DE TABLAS

TABLA 1 – Características del Modelo de Autómata Celular .....	28
TABLA 2 – Ficha técnica de moto-taxi.....	35
TABLA 3 – Cantidad de vehículos registrados en la intersección .....	42
TABLA 4 – Tiempos de parada de buses .....	47
TABLA 5 – Composición vehicular de la intersección .....	48
TABLA 6 – Volúmenes presentes en la intersección .....	49
TABLA 7 – Rutas elegidas por los vehículos de cada acceso .....	50
TABLA 8 – Velocidades en giros dentro de la intersección.....	55
TABLA 9 – Velocidades en la avenida principal .....	56
TABLA 10 – Tiempos de viaje de primera corrida del software.....	60
TABLA 11 – Número mínimo de corridas .....	61
TABLA 12 – Tiempos de viaje obtenidos para calibración.....	63
TABLA 13 – Tiempos de viaje obtenidos para validación.....	66
TABLA 14 – Resultados obtenidos de la simulación .....	68

## CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

El caos vehicular es una de las principales causas del descontento en la población y tiene su origen en la década de los 90, cuando se liberó el servicio de transporte público y permitió la importación de vehículos usados. Esto, sumado al surgimiento de rutas mal diseñadas, empeoró el servicio que se brindaba al usuario y, como rápida medida, se inició la búsqueda de un transporte alternativo. Por ello, en el año 1991, surgió la moto-taxi, la cual se presentó como una opción para aquellos que necesitaban trasladarse en distancias cortas a un bajo costo; sin embargo, lejos de ser una solución, con el paso de los años, se han ido adueñando de las redes viales, en especial en los distritos donde predominan las clases sociales C, D y E.

El aumento constante de vehículos particulares y de transporte público, además del comportamiento agresivo de sus conductores, y poco respetuoso de aquellos más vulnerables, nos da a entender que es necesario encontrar soluciones al problema desde otro punto de vista, empleando herramientas que nos permitan comprender la circulación de todo tipo de vehículos y personas involucradas en un área de estudio.

Como parte de los estudios realizados para comprender el flujo vehicular, principalmente en intersecciones, se elaboran modelos de tráfico de diversa escala, siendo uno de los más empleados la micro-simulación. Sin embargo, esta herramienta, creada en países desarrollados, no considera como vehículo típico a las moto-taxis ni a sus conductores, quienes presentan un comportamiento agresivo.

Por ello, en este proyecto se realizará una investigación con la finalidad de determinar sus características geométricas y de operación que permitan representar adecuadamente su comportamiento en la ciudad de Lima. Para ello, se empleará el software VISSIM 8.0 y se analizará la intersección, regulada por prioridad de paso, de la avenida Villa María con el jirón Progreso en el distrito de Villa María del Triunfo.

## **1.1. Objetivo general y objetivos específicos**

### **1.1.1. Objetivo general.**

El objetivo del proyecto es representar, mediante el software VISSIM 8.0, el comportamiento de ciertos tipos de vehículos presentes en la ciudad de Lima, en particular el de las moto-taxis. Para ello se tendrán en cuenta sus parámetros de fabricación e interacción con los peatones y demás vehículos.

### **1.1.2. Objetivos Específicos.**

Los objetivos específicos del proyecto se enfocan en conocer las características de la circulación vehicular dentro del área de estudio. Así mismo, aplicar el software Vissim 8.0 para representar la interacción de diferentes tipos de vehículos incluyendo las moto-taxis. Por último, conocer el comportamiento operacional de las moto-taxis para ser comparadas con otros vehículos convencionales.

## **1.2. Hipótesis**

Se puede representar el comportamiento de las moto-taxis a partir de las características físicas del vehículo y las psicológicas de su conductor, de acuerdo a lo propuesto por el modelo de Wiedemann. Además, los modelos de seguimiento y lateral permiten que más de un moto-taxi ocupe el mismo tramo de vía a la vez.

## **1.3. Limitaciones**

El estudio se limita a obtener los parámetros de la moto-taxis y a simular la intersección en estudio, mas no propone una solución alternativa a los problemas de congestión vehicular presentes en el área de estudio. Además, los resultados del estudio no pueden ser aplicados a otro lugar bajo otras condiciones, pues cada simulación es única. Los parámetros base obtenidos de los vehículos atípicos sí podrán servir para el modelamiento de otra zona con presencia de moto-taxis.

## CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. Modelación de intersecciones no semaforizadas

Las intersecciones no semaforizadas son las más frecuentes en una red vial. Su correcto análisis es relevante, ya que un funcionamiento deficiente podría afectar todo un sistema de transporte correctamente diseñado. Además, la inexistencia de señalizaciones crea jerarquías entre las vías de la intersección.

Existen dos tipos de intersecciones empleadas en una red de tránsito: intersecciones no controladas e intersecciones reguladas por prioridad, como es el caso de intersecciones con señalización de Pare o Ceda el paso. Para el caso de intersecciones controladas por señales de Pare, se incorporan al modelo las decisiones del conductor que circula por la vía secundaria y que desea ingresar o cruzar la intersección. (HCM, 2000)

#### 2.1.1. Modelos de análisis de la capacidad

El análisis de la capacidad para este tipo de intersecciones se realiza con métodos aplicados, en su mayoría, en Estados Unidos y en Europa. En primer lugar, se tiene el modelo teórico de aceptación de brechas, el cual está basado en la brecha crítica y el avance de cola. En segundo lugar, se presenta el método de regresiones empíricas, el cual está justificado en los resultados de las investigaciones realizada por los británicos Kimber y Coombe (1980).

##### 2.1.1.1. Modelo de aceptación de brecha

Como se mencionó anteriormente, este tipo de intersecciones presentan prioridades en las vías, siendo la de mayor prioridad el lugar donde se crean las brechas entre los vehículos. En las vías de menor prioridad los vehículos aprovechan estas brechas para poder cruzar la intersección.

El primer vehículo de la vía secundaria funciona como tapón y se encuentra a la espera de que se presente una brecha mayor a la brecha crítica  $t_c$  con la finalidad de poder realizar un movimiento. Posteriormente, el segundo vehículo pasa a la primera posición y se repite el proceso. No obstante, existe la posibilidad de que más de un vehículo cruce la vía para la misma brecha, el cual se conoce como tiempo de avance de cola  $t_f$ .

Para poder calcular la capacidad, se plantean los siguientes supuestos:

- Los vehículos de la vía prioritaria son homogéneos, por lo que las brechas entre vehículos son las mismas en cada intervalo. Por ello, se trabaja con intervalos de tiempo  $h$  en lugar de brechas.
- Los conductores de la vía secundaria presentan un comportamiento homogéneo. Por lo tanto, la brecha crítica es la misma para todos los conductores en cada intervalo de tiempo.
- Los vehículos de la vía secundaria son homogéneos, por lo que los tiempos de avance son los mismos para cada vehículo

De esta manera, se tiene que el tiempo  $h$  que requiere un vehículo para cruzar la intersección está definido dentro del siguiente intervalo:

$$t \leq h < t + \beta$$

De manera similar, el tiempo  $h$  que requieren  $n$  vehículos para cruzar la intersección, donde  $\beta$  es el tiempo de avance de cola:

$$t + (n - 1)\beta \leq h < t + n\beta$$

Además, la capacidad es calculada de la siguiente manera:

$$Q_s = \frac{q_p e^{-q_p t_c}}{1 - e^{-q_p t_f}} \quad (1)$$

Donde:

- $q_p$ : Flujo de la vía principal
- $Q_s$ : Capacidad de la vía secundaria
- $t_c$ : Brecha crítica
- $t_f$ : Tiempo de avance de cola

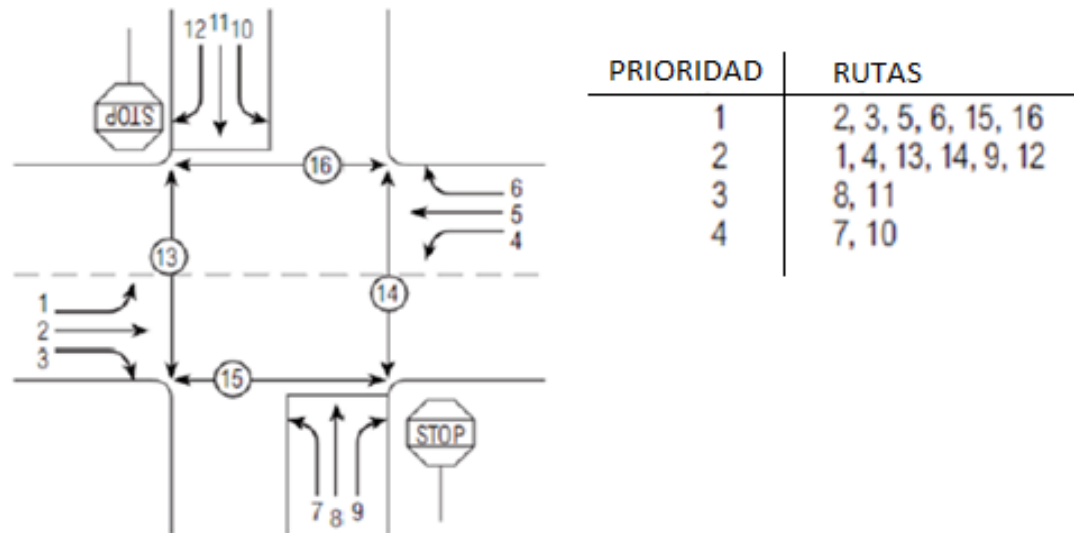
En base a este modelo genérico se han desarrollado otros modelos entre los cuales destacan el modelo de Plak y Cathpole, el modelo de Tanner, el modelo de Gordon y Miller y el modelo de Van Vliet.

El modelo de brechas ha sido criticado debido a los supuestos en los que se basa. Los parámetros necesarios para el desarrollo del modelo son variables ya que dependen de los primeros vehículos de la red secundaria, los cuales no se pueden homogeneizar ya que el comportamiento de cada conductor será, difícilmente, el mismo (Fernandez, 2011).

En contraste a esto se tiene el modelo de brecha para una intersección controlada en jerarquías de movimientos en las vías que forman la intersección, de tal manera que no se generen conflictos al momento de realizar los giros. Los vehículos de la vía secundaria o de



menor prioridad se detienen ante la señal de Pare o Ceda el paso y esperan el momento indicado para realizar su maniobra (TRB, 2000).



**FIGURA 1 – Jerarquía en una intersección simple regulada por prioridad de movimientos. Fuente: Adaptado de TRB (2000)**

De esta manera, se tienen los flujos de Nivel 1 de jerarquía, los cuales tienen una prioridad absoluta. Los vehículos que se encuentren en este nivel no tendrían por qué detener su circulación. Además, en este primer nivel se encuentran los vehículos que realizarán maniobras que no interfieran con las de los otros vehículos; de acuerdo a la gráfica, estos flujos serían el 2, 3, 5, 6, 15 y 16. Luego, tenemos el flujo de Nivel 2, cuyos vehículos solo se detienen ante los vehículos que circulan por la vía de Nivel 1. Los movimientos de los vehículos de este nivel se encuentran en interferencia con los del Nivel 1, por ello deben detenerse a la espera de una brecha. Por ejemplo, los vehículos del flujo 1 desean voltear a la izquierda; sin embargo, se ven impedidos por la circulación del flujo 5, por lo que deben detenerse debido a que estos tienen la prioridad. De acuerdo a la gráfica, los flujos 1, 4, 13, 14, 9 y 12 pertenecen a este nivel. Lo mismo sucede con los vehículos de la vía de Nivel 3 que ceden el paso tanto a los vehículos de las vías de Nivel 1 y 2. Se emplea el mismo criterio para los vehículos que circulan por una vía de Nivel 4 (TRB, 2000).

#### 2.1.1.2. Modelo de regresión lineal

El modelo de brecha se basa en supuestos que no resultan muy precisos en la práctica, lo que afecta el cálculo de la capacidad en una intersección. Como medida de solución se propusieron los modelos de regresión lineal.

De acuerdo con Fernández (2011) los modelos de regresión lineal son basados en aproximaciones empíricas realizadas en las intersecciones, lo cual se diferencia del modelo de brecha. Estos modelos nos permiten determinar la capacidad de los movimientos secundarios que se realizan en una intersección, ya sea el giro a la derecha o izquierda desde una vía secundaria a una principal o el giro a la izquierda desde una vía principal a una secundaria.

Los modelos de regresión lineal buscan determinar la capacidad de un movimiento secundario. Esta capacidad se ve disminuida de acuerdo a la cantidad de vehículos que circulan por la vía principal, de la siguiente manera:

$$Q_s = Q_0 - \sum_{i \in P} \alpha_i q_{pi} \quad (2)$$

Donde:

- $Q_s$ : Capacidad de cada movimiento secundario
- $Q_0$ : Capacidad básica de un movimiento secundario
- $P$ : Conjunto de movimientos prioritarios que se oponen al movimiento secundario
- $q_{pi}$ : Flujos de los movimientos de  $P$
- $\alpha_i$ : Impacto marginal de los movimientos  $P$  en la capacidad

En el año de 1980, Kimber y Coombe realizaron una serie de experimentos en intersecciones con diversos diseños geométricos para poder determinar la capacidad de las mismas. Como resultado se obtuvieron los parámetros  $Q_0$  y  $\alpha_i$ .

$$Q_s = X(Q_0 + Z - Y \sum_{i \in P} \alpha_i q_{pi}) \quad (3)$$

Donde los valores de  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  dependen de la geometría de la intersección:

$$Z = 14W_M \quad (4)$$

$$Y = 1 - 0.0291W \quad (5)$$

$$X = [1 + 0.099(w - 3.55)][1 + x_1(V_L - 120)][1 + x_2(V_D - 150)] \quad (6)$$

Y las variables geométricas representan lo siguiente:

- $W_M$ : Ancho de la mediana de la vía prioritaria
- $W$ : Ancho de la vía prioritaria
- $w$ : Ancho de la pista de movimiento secundario
- $V_L, V_D$ : Visibilidad a la izquierda y derecha del acceso secundario
- $x_1, x_2$ : Parámetros que dependen del movimiento secundario

### **2.1.2. Parámetros de eficiencia**

TRB (2000) define los parámetros de eficiencia como una característica cualitativa o cuantitativa de la vía que provee información sobre el estado del servicio de la misma en el instante estudiado. En otras palabras, los MOE's, por sus siglas en inglés (Measures of effectiveness), indican qué tan óptimo es el funcionamiento de una vía.

Como se ha mencionado anteriormente, las vías son diseñadas para una cierta capacidad, que podría ser excedida por el flujo que circula por esta. En estos casos, los conductores se ven obligados a detenerse o a formar colas hasta que la circulación se reinicie. A continuación, se mencionarán algunos parámetros que determinan la eficiencia de un dispositivo vial que, bajo condiciones ideales, debería mantener una circulación fluida.

#### **2.1.2.1. Demoras**

La demora es un parámetro que nos permite determinar cuán eficiente es una intersección ya que mientras menor sean los tiempos de demora, menor será la congestión en dicha intersección. Las demoras pueden producirse debido a señales de control, la generación de colas a lo largo de una vía, o cuellos de botella.

En el TRB (2000) se especifica que, de las tres formas de representar la demora descritas en el manual, para el caso particular de intersección reguladas por señales de pare, como es el caso del presente estudio, se utiliza la demora media por detención como indicador de eficiencia de una vía en estudio.

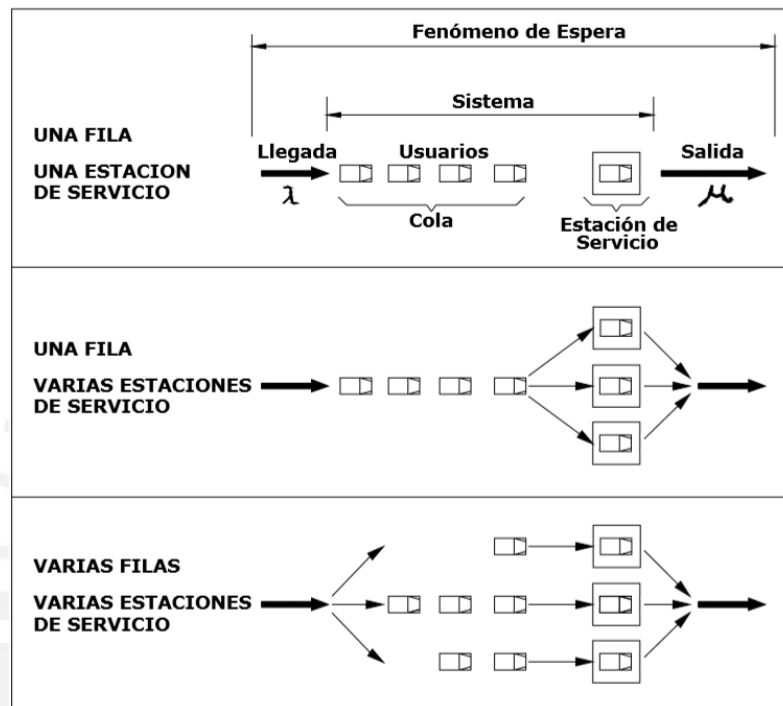
#### **2.1.2.2. Colas**

Las colas son un buen indicador de la eficiencia de una vía ya que su presencia supone congestión vehicular, la cual surge cuando la demanda supera la capacidad de una intersección. A pesar que el flujo se ha detenido, algunos vehículos continúan ingresando a la intersección, lo que hace que sea poco probable que puedan cruzar. En conclusión, lo ideal sería que ningún vehículo se mantenga más de un periodo en espera (TRB, 2000).

De acuerdo a (Fernández, 2011), se especifica que cada cola tiene características distintas que están definidas por tres criterios. El primero es el proceso de llegada, donde se detallan los intervalos de llegada  $t$  de cada cliente, ya sean constantes o aleatorios. El segundo es el mecanismo de atención, donde se determina el número de colas presentes y la cantidad de tiempo que se demora un cliente en salir de ella. La tasa de servicio o atención se expresa como  $\mu$ . Por último, se encuentra la disciplina en la cola, que define los patrones de

selección para el siguiente cliente. Por ejemplo, First in First out que atiende por orden de llegada, Last in First out donde se atiende primero al último que llega y prioritario, en donde se atiende primero al de mayor prioridad.

En la figura 2 se muestran algunos tipos de colas presentados en el libro Ingeniería de Trafico (Cal et al, 1994), donde se puede apreciar que se pueden formar varias colas en una vía y que cada conductor es libre de colocarse en donde le parezca más conveniente.



**FIGURA 2 – Tipos de colas. Fuente: (Cal y Mayor et al, 1994)**

### 2.1.2.3. Detenciones

Se define como el acto de detener el vehículo tanto en una intersección semaforizada como no semaforizada. Se puede producir por la formación de colas, señales de pare o ceda el paso. El número de detenciones en una intersección puede ser variable, dependerá del flujo que circula por la vía y del tipo de intersección que se analiza. Por ejemplo, para el caso de una intersección con señal de pare, cada vehículo se detendrá al menos una vez. En caso de que el flujo supere la capacidad de la vía, ante la formación de colas, es posible que cada vehículo tenga que hacer dos o más paradas (Fernández, 2011).

La evaluación de estos parámetros para solucionar los problemas de la aceptación de capacidad puede ser enfocada desde dos puntos de vista. En primer lugar, se puede emplear la teoría de colas y en segundo lugar podemos enfocarnos en la simulación.

### 2.1.3.Simulación

En el presente estudio se realizará un modelo de micro-simulación. Para ello, primero es necesario entender las implicaciones que suponen realizar un estudio de esta naturaleza e identificar los diferentes tipos de escala de simulación y demás factores o datos necesarios para poder ejecutar los modelos.

Se define “simulación” como el acto de representar, o pretender ser algo que no es (RAE, 2015). Coss lo define de la siguiente manera:

*“La Simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema” (Coss, 1994).*

En este sentido, podemos entender que la simulación nos permite reflejar la realidad a través de un modelo computarizado y que, mediante este modelo, se nos permite ampliar nuestros conocimientos hacia nuevas perspectivas, de tal manera que se logre una mejora de los sistemas en estudio. Esta herramienta nos permite tener una visión general del sistema en estudio y manejar diversas situaciones de acuerdo a las modificaciones que se pueden ir haciendo al modelo una vez que esté terminado. Esto nos da la ventaja de ver diferentes eventos que puedan suceder en la realidad.

Un estudio de simulación comprende diferentes etapas que se deben cumplir antes de poder presentar los resultados del estudio. En primer lugar, se debe identificar claramente el sistema que se desea representar, lo que nos permite tener claro cuáles son sus restricciones y las variables que intervienen en el estudio. Luego, se debe elegir el modelo que se utilizará para el estudio. Se debe tener en cuenta que de esta elección dependerán las variables que se introducirán en el modelo, y cuya recolección de datos podría resultar un inconveniente para el desarrollo de la investigación. A continuación, se procede a calibrar el modelo para garantizar una simulación certera. Finalmente, con la información proporcionada por el modelo se realiza la interpretación de resultados y se procede a documentar la información recolectada.

Debido a que se trata de un modelo de simulación, se analizarán los objetos en estudio como elementos independientes uno respecto de otro, por lo que se debe trabajar con un modelo estocástico, es decir, no determinístico y definido por elementos aleatorios que se adecúen a nuestras necesidades. Se debe considerar que el tamaño de la muestra a estudiar se determina en función del grado de precisión que deseemos obtener ya que de esto dependen los



resultados y las decisiones que tomemos para proponer soluciones en la realidad (Coss, 1994).

La simulación tiene un amplio rango de aplicaciones que pueden ir desde sistemas de inventarios hasta sistemas económicos. La elección de los modelos y programas de simulación dependerá de la naturaleza del estudio a realizar y de los alcances del mismo. Para el presente caso, se realizará una simulación de tráfico vehicular. Esto se explicará en el siguiente apartado.

### **2.1.3.1. Simulación de tráfico vehicular**

La simulación ha facilitado el análisis de tráfico vehicular mediante el empleo de modelos de diferentes escalas, desde los cuales se puede enfocar una situación en particular. El U.S Department of Transportation, en el año 2004, enumera una lista de categorías para realizar una simulación (FHA, 2004).

Es importante definir el nivel de detalle que se realizará en el estudio, entre los cuales destacan los modelos microscópicos (alta fidelidad), mesoscópicos (fidelidad combinada) y macroscópicos (baja fidelidad).

#### **➤ Modelo Macroscópico de simulación**

Los modelos macroscópicos describen el comportamiento vehicular representándolo en términos de flujo, densidad y velocidad. A su vez, los parámetros necesarios para realizar un estudio vehicular y su calibración son menos generales que en los modelos microscópicos, por ello se suele emplear estos modelos en amplios sistemas viales. Sin embargo, el modelo macroscópico solo es aplicable si se asume que los vehículos se comportan como un flujo dinámico.

Los modelos macroscópicos se basan en la siguiente ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

Se puede observar que el modelo no considera las posiciones y velocidades de todos los vehículos que participan en el análisis. Solo se toma en cuenta el número de vehículos presentes en un tramo de carretera, llamándole densidad, y una velocidad promedio. Ambas se presentan en función de una posición y un tiempo aleatorio. Además,  $v(x, t)$  es la tasa de vehículos que entran y dejan una sección libre de longitud  $dx$ .

Las diferencias de los diversos modelos macroscópicos empleados actualmente, se deben principalmente a la relación considerada entre la velocidad y la densidad. Entre los

modelos macroscópicos más comunes tenemos al de Greenshield, Greenberg y Underwood.

➤ **Modelo mesoscópico de simulación**

Los modelos mesoscópicos de simulación se enfocan en el estudio de los vehículos individualmente y nos muestra las velocidades de los vehículos simulados en la sección estudiada, pero en forma agregada (grupal).

### **2.1.3.2. Micro-simulación**

En la década de los 90, se logró introducir la micro-simulación de tráfico como una herramienta que permite analizar a detalle los problemas de congestión vehicular. Este avance resultó muy importante para la simulación debido a las ventajas proporcionadas respecto de los métodos tradicionales de modelación de tráfico. La primera trata de representar el comportamiento de cada vehículo de forma individual en intervalos de tiempo menores a 1 segundo, mientras que modelos tradicionales promedian los valores obtenidos de una matriz Origen-Destino (O-D) para calcular el tiempo de viaje dentro de la red de tráfico en intervalos de 1 hora o más, aplicando modelos empíricos que relacionan el flujo y la capacidad. La segunda está centrada en las características necesarias para mostrar una plataforma dentro de una realidad virtual, lo cual no se había observado antes en modelos tradicionales de tráfico. (Wood, 2012).

El concepto de micro-simulación abarca diversos aspectos. En primer lugar, al ser un modelo de simulación vehicular, se emplean ciertas condiciones para representar los distintos comportamientos vehiculares. Para ello se requiere del empleo de programas que ayuden a reproducir lo que sucede en la realidad y que analicen el comportamiento de vías con una geometría complicada y/o tráfico congestionado. Por último, la micro-simulación es de carácter dinámico, estocástico y discreto. Estos conceptos serán detallados a profundidad en los siguientes puntos.

La característica más importante respecto de otros modelos de simulación es la interacción presentada entre un vehículo y los demás, además del ambiente que los rodea. Esta diferencia favorece notablemente la representación del modelo, puesto que no asume una homogeneidad entre los conductores y los vehículos, sino que cada vehículo es independiente de los demás, lo que genera un modelo más preciso (Johansson, 2013).

Para representar los comportamientos y las características vehiculares en la micro-simulación se emplean los modelos de seguimiento vehicular. Entre los principales se encuentran: el modelo de Pipes, el de General Motors, de los Autómatas Celulares y,

finalmente, el modelo de Wiedemann. Este último es empleado por el software VISSIM 8.0. Estos modelos son los que otorgan a la micro-simulación una particularidad que los diferencia de otros.

#### 2.1.3.2.1. Características de la Micro-simulación

- **Carácter Aleatorio o Estocástico**

La naturaleza aleatoria o estocástica no es exclusiva de análisis vehiculares. Este carácter es empleado en diversas ramas de la economía, ingeniería, matemática, ciencia, biología, etc. Una forma de definirlo es tratándolo como un sistema o proceso que presenta un comportamiento no determinístico. Un modelo determinístico es un modelo matemático donde los mismos valores de entrada generarán las mismas salidas ya que no existe alguna posibilidad para la variación aleatoria (Business Dictionary, 2015), mientras que un modelo estocástico no producirá las mismas salidas, porque es producto de la eventualidad y presenta cierta incertidumbre, la cual tendría que presentarse en un rango aceptable para poder validar nuestro modelo.

Existen situaciones donde modelos determinísticos podrían ser empleados debido a que el efecto estocástico no es muy grande; sin embargo, cuando la incertidumbre aumenta, los resultados esperados por modelos determinísticos no suelen ser los correctos. En la figura 3 se puede apreciar un diagrama de bloques para los modelos. En él se puede observar una entrada  $I$ , la cual va a ser procesada y modificada, se alteran sus valores o comúnmente llamadas “variables de estado” y se genera una respectiva salida  $O$ .



**FIGURA 3 – Diagrama de bloques de un modelo. Fuente: Propia**

Para un modelo estocástico una única entrada genera diversas variables de estado, lo cual resultaría en diversas salidas. Por ejemplo, se puede simular el modo en que se desplazan las personas a lo largo de una calle principal si empleamos variables estocásticas que representen su comportamiento, y luego empleando alguna función o algoritmo probablemente estocástico que indique el tiempo que toman para entrar y salir de la calle principal (Universidad de Murcia, 2014).

Para poder medir y/o aproximar el comportamiento de algún estudio, es necesario el empleo de probabilidades. En la micro-simulación de tráfico, algunos valores resultarán del empleo

de mediciones y otros podrán ser controlados; sin embargo, existen algunas variables que no podrán serlo.

En un primer tiempo, los modelos de tráfico solían ser determinísticos, ya que no existían las herramientas necesarias para poder realizar gráficas de distribuciones y probabilidades. Ahora que sí existen las herramientas necesarias para este fin, un análisis vehicular puede empezar con la descripción de un modelo de tráfico estocástico, en el cual se determina características provenientes de distribuciones estadísticas (empleando números aleatorios), a los vehículos y sus conductores. Además, estos números aleatorios provendrán de un número “semilla”, la cual, al ser modificada, producirá una diferente secuencia de números aleatorios, el cual, a su vez, generará diferentes valores de las características de los vehículos y sus conductores (FHWA, 2004).

- **Actualización del Sistema**

Como se mencionó previamente, una de las características de la micro-simulación es su carácter discreto. No obstante, para definir este modelo, es necesario hablar también de modelos continuos, explicando las diferencias entre ambos. En los modelos discretos, las variables empleadas son cambiantes en determinados momentos del tiempo, en estos momentos ocurre el cambio de estado como se mencionó en la figura 3. Los modelos continuos, por su parte emplean ecuaciones diferenciales que dan valores o salidas continuas para un grupo de variables de entrada basadas generalmente en el tiempo.

Ambos modelos son la base de los sistemas dinámicos, los cuales son sistemas físicos cuyo estado o valores internos evolucionan o cambian con el tiempo (Universidad de Murcia, 2014). La figura 4 refleja el comportamiento de cada uno de estos modelos.



**FIGURA 4 – Tiempo Continuo vs. Tiempo Discreto. Fuente: Adaptado de Ossimitz y Mrotzek, 2008**

Para la micro-simulación de tráfico, resulta más exacto trabajar con modelos discretos, ya que las variables de estado generalmente cambian en intervalos de tiempos muy pequeños. Es por ello que The Institution of Highway and Transportation determina dos tipos de modelos: Modelos de tiempos discretos y Modelos de eventos discretos.

En los modelos de tiempos discretos, los cuales suelen ser los más empleados, la actualización del sistema se da en intervalos de tiempo fijos, ya sea 1 o 0.1 segundos. Por otro lado, en modelos de eventos discretos, los intervalos de tiempo que se dan entre las actualizaciones del sistema no son iguales y son provocados por acontecimientos externos. Estos se pueden interpretar como hitos, ya que generalmente son acontecimientos de importante magnitud. Por ejemplo, los cambios de señales constantes presentados a lo largo de una red vial.

- **Número semilla**

La micro-simulación, al ser un modelo estocástico, necesita tener la capacidad de generar números aleatorios. Sin embargo, estos números son de carácter pseudo-aleatorios ya que son generados a partir de un medio computarizado, empleando algoritmos determinísticos.

$$r_i = \{r_1, r_2 \dots, r_n\} \quad , n \text{ es el periodo o ciclo de vida}$$

El valor  $r_i$  abarca al conjunto de números necesarios, entre 0 y 1, para realizar una simulación y se le conoce como número pseudo-aleatorio (para nuestro caso son números aleatorios). Para la obtención de estos números se emplean diversos algoritmos generadores de valores. A continuación, se muestra un algoritmo determinístico congruencial, el cual es empleado la mayoría de procesos de simulación.

### **Teorema de congruencia lineal**

La teoría de congruencias es introducida por Gauss en el año 1801; sin embargo, esta fue aplicada por Euler, Lagrange y Legendre años previos. El teorema parte de la siguiente ecuación:  $ax \equiv b \pmod{m}$ , en la cual  $a, b \in \mathbb{Z}$  y  $m \in \mathbb{N}$ . La solución se basa encontrar un valor múltiplo de  $m$ , para que sumado o restado a  $ax$  resulte  $b$ . Expresado matemáticamente sería:

$$ax + my = b.$$

Para la simulación se emplea el siguiente algoritmo congruencial lineal:

$$S_i = (aS_{i-1} + b) \pmod{c} \quad (8)$$

Dónde:  $c$ : Módulo,  $c > 0$ , es la cantidad máxima de números que la ecuación puede producir.

$a$ : Multiplicador,  $0 < a < c$

$b$ : Incremento,  $0 < b < m$



$S_o$ : Valor de entrada, usualmente llamado “semilla”, ya que es el valor que entregará los siguientes números.

$$r_i = \frac{Si}{c} \quad (9)$$

- **Generación de los vehículos en el modelo**

Es necesario saber la forma en que los vehículos son generados en la entrada del área a estudiar. Para ello se mostrará un ejemplo del “Traffic Analysis Tool Volumen III” para familiarizarse con este punto.

Ejemplo: Se considerará una distribución de avance vehicular constante y un volumen establecido para 15 minutos de periodo:

$$H = \frac{3600}{v} \quad (10)$$

El resultado brindará el tiempo en segundos que demorará cada vehículo en aparecer en la entrada, este periodo de tiempo se asume constante, pero en la realidad esto no se cumple. Por este motivo se necesitará establecer una distribución de avance vehicular que cumpla con las siguientes normas: la posición de un vehículo debe ser independiente de la de los demás y el número de vehículos que llegue a dicho punto en cierto periodo de tiempo será independiente de aquel que llegue durante cualquier otro periodo de tiempo de misma duración.

### **Distribución de Poisson**

Esta distribución tiene como característica ser una función discreta y se encarga de hallar la probabilidad de ocurrencia de  $x$  repeticiones de un suceso o evento. Esto se hace empleando un parámetro  $m$  que promedia las repeticiones en cada ocasión.

$$P_{(x)} = \frac{m^x e^{-m}}{x!} \quad (11)$$

Donde:  $P_{(x)}$ : Probabilidad de llegada de  $x$  vehículos en un lapso  $t$

$m$ : Promedio del número de vehículos neperianos durante el tiempo  $t$

$e$ : Base de los logaritmos neperianos = 2.71828

### **Distribución exponencial negativa**

Para explicar la distribución exponencial negativa es importante saber que esta proviene de la de Poisson. Si se asume que ningún vehículo llega durante un lapso  $t$  ( $x=0$ ):

$$P_{(0)} = \frac{m^0 e^{-m}}{0!} = e^{-m} \quad (12)$$

Como se asumió que ningún vehículo llega en un período  $t$ , se puede deducir que el intervalo de tiempo  $i$  entre vehículos tiene que resultar igual o mayor que  $t$ , entonces:

$$P_{(0)} = P_{(i \geq t)} \quad (13)$$

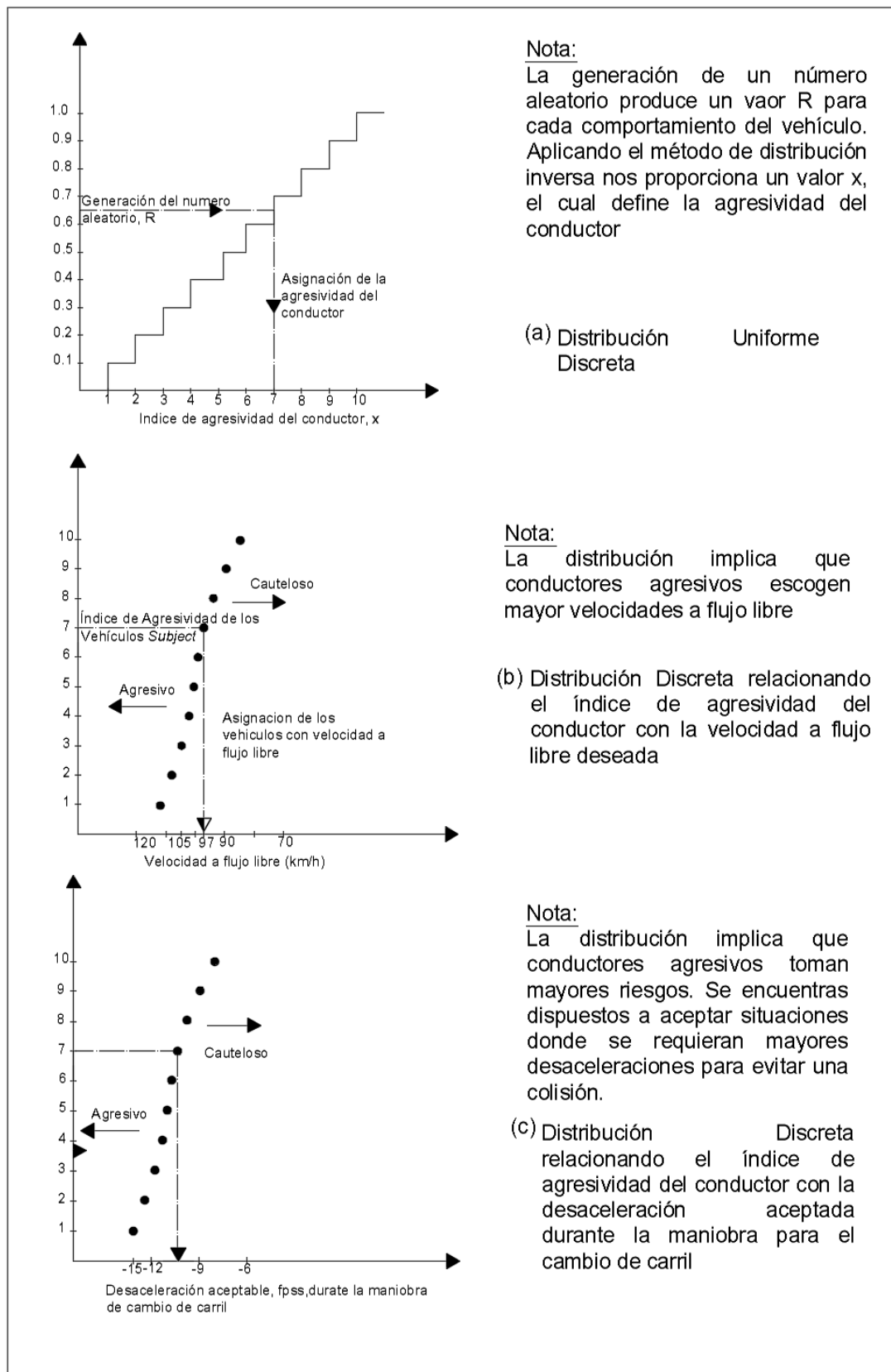
Si  $q$  es el volumen de tránsito que circula por el carril expresado en vehículos por hora y  $m$  es el promedio del número de vehículos que llegan durante el tiempo  $t$ , el valor de  $m$  se puede expresar por:

$$m = \frac{tq}{3600} \quad (14)$$

Reemplazando las dos últimas ecuaciones obtenidas en la primera ecuación se obtiene:

$$P_{(i \geq t)} = e^{-\frac{tq}{3600}} \quad (15)$$

La ecuación anterior se denomina distribución exponencial negativa y representa una función continua, a pesar de venir de la distribución de Poisson, el cual representa una función discreta.



**FIGURA 5 – Generación de las características del conductor. Fuente: Adaptado de FHWA, 2004**

- **Número de Corridas (Traffic Operation Analysis Tool)**

Como se mencionó anteriormente, uno de las características principales de la micro-simulación es su carácter estocástico, producto de valores pseudo-aleatorios. Por ello, cada valor que se coloque al “número semilla” nos generará resultados diferentes, ya que no solo variará el tiempo de salida de cada vehículo, sino también cambiarán las características de este. No obstante, aún no podemos saber cuántas veces debemos correr el modelo, ya que una cantidad muy pequeña de corridas no podrá satisfacer la demanda exigida por nuestro modelo y el empleo de demasiadas corridas exigirá demasiado tiempo para realizar un análisis final. Este análisis arrojará una gran cantidad de datos para cada corrida, los cuales deben de ofrecernos la seguridad de que se esté representando correctamente el modelo a la realidad. Debido a que establecer muchas corridas genera tiempo y costo adicional, es necesario la realización de distribuciones continuas para poder tener intervalos de confianza y márgenes de error. Como se observará más adelante, el proceso para determinar el número de corridas es iterativo y depende exclusivamente del intervalo de confianza y la tolerancia a escoger.

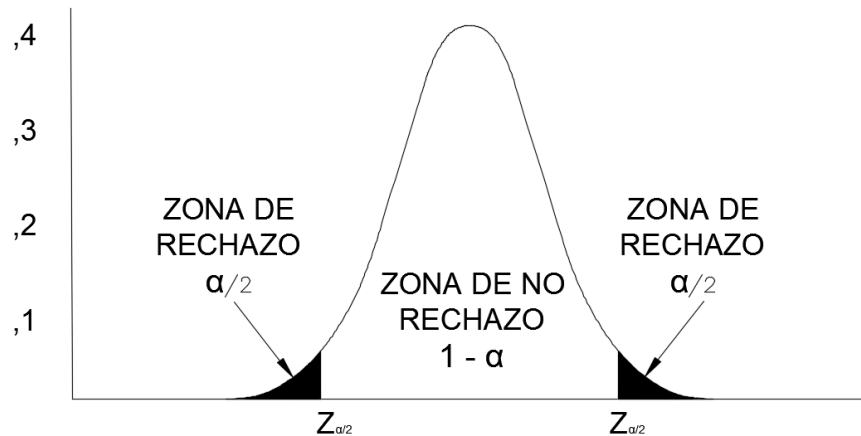
La FHWA (2004) menciona un número de corridas necesarias para la calibración. Para ello es necesario obtener los siguientes datos: Desviación Estándar ( $s$ ), Intervalos de Confianza y Nivel de Confianza.

Para el cálculo de la desviación estándar se necesitará un valor inicial de corridas para ser ejecutadas variando el número semilla.

$$s^2 = \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{N-1} \quad (15)$$

El nivel de confiabilidad o confianza nos indica cuán acertado de la realidad se encuentra la muestra representativa. Con la desviación estándar calculada, es posible realizar una gráfica de distribución normal, la cual refleja la frecuencia del parámetro a calibrar. De la figura 6 se observa que el nivel de confianza está representado por  $1 - \alpha$ , ya que el nivel de significancia es  $\frac{\alpha}{2}$ , la cual representa el posible error que producirán resultados negativos en el modelo.

El intervalo de confianza se encuentra dentro la Zona de no rechazo mostrada en la figura 6. En este se encuentran todos los posibles valores que pueden representar al valor real. Para tener un nivel de confianza que garantice la representatividad de la muestra, generalmente se emplea un 95% y una tolerancia del 10%. Es necesario recalcar, que, a mayor nivel de confianza empleado, más repeticiones serán necesarias porque se necesitaría satisfacer un nivel mayor de exigencia.



**FIGURA 6 – Nivel de confiabilidad. Fuente: Propia**

- **Warm Up o Periodo de Estabilización del Sistema**

Es necesario tener en cuenta que cuando uno corre un modelo, en un inicio no existe ningún vehículo en la red. No obstante, si se desea tener un modelo que refleje realmente el comportamiento del área de estudio, es necesario no considerar un periodo de tiempo inicial para que estas condiciones no afecten nuestro modelo. Por ello, es necesario emplear el Periodo de estabilización del sistema.

La FHWA determina este periodo de la gráfica de Número de vehículos en el sistema vs. Tiempo de simulación. El periodo de estabilización del sistema terminará cuando se alcance un equilibrio; es decir, cuando el número de vehículos reduzca su tendencia a aumentar y esta sea relativamente constante. Si no se logra encontrar esta reducción, se puede considerar que el periodo es por lo menos el doble del tiempo que tomaría recorrer una red sin vehículos ni obstáculos a una velocidad de flujo libre. (FHWA, 2004)

#### **2.1.3.2.2. Teoría de Seguimiento Vehicular**

Esta teoría trata de explicar el comportamiento que tendría un vehículo perseguidor respecto de un vehículo líder, el cual se encuentra adelante del primero. Por ejemplo, inicialmente los vehículos se encuentran separados por una distancia relativamente grande; sin embargo, cuando la distancia es menor a la mínima exigida por el vehículo perseguidor, este empieza a desacelerar. Si la distancia fuese muy grande, entonces el vehículo perseguidor tendería a acelerar y el comportamiento del vehículo líder no le afecta.

Además, existe una serie de condiciones que definen esta teoría. En primer lugar, la máxima aceleración dependerá de la velocidad actual del vehículo; es decir, se encuentra limitada.

Por ello, si un conductor maneja más rápido, la aceleración máxima del vehículo será menor. En segundo lugar, la máxima aceleración estará influenciada por el conductor, ya que un conductor hábil podría llegar a tener valores cercanos a la aceleración máxima del vehículo y un conductor principiante tendría valores mucho menores. Por último, un conductor típico tendrá el promedio de los dos tipos de conductores previamente mencionados, lo cual generará valores mucho menores a los que realmente puede ofrecer un vehículo.

Con estos criterios observamos que la aceleración de un vehículo dependerá tanto de las características vehiculares, pero principalmente de los estímulos del conductor.

La FHWA representa la aceleración del vehículo perseguidor mediante la siguiente ecuación:

$$a_f = F(v_l, v_f, s, d_l, d_f, R_f, P_i) \quad (16)$$

Donde:

$a_f$  = aceleración del vehículo perseguidor

$v_l, v_f$  = Velocidades del vehículo líder y perseguidor

$s$  = distancia de separación

$d_l, d_f$  = Desaceleración proyectada del vehículo líder y perseguidor

$R_f$  = Tiempo de reacción del conductor perseguidor

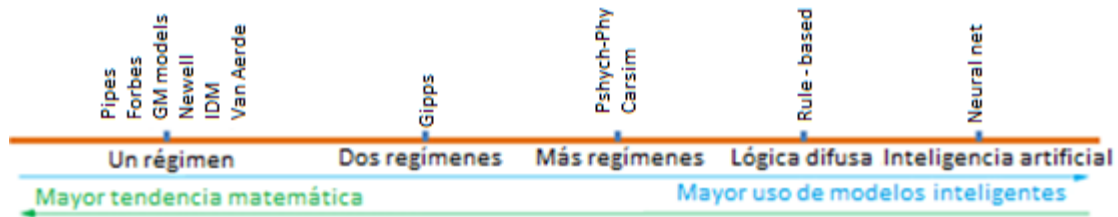
$P_i$  = Otro tipo de parámetro

También, subdivide el objetivo del vehículo perseguidor en tres etapas. En primer lugar, se encuentra la percepción, en el cual el vehículo perseguidor recolecta toda la información visual que pueda, esta información dependerá del movimiento del vehículo líder y sus características físicas (implicando las variables mencionadas en la ecuación 16). En segundo lugar, el conductor interpreta toda la información obtenida, clasificando la información considerando su experiencia previa y comparando las habilidades de conducir entre ambos para finalmente tomar una decisión. Por último, el vehículo perseguidor entra en una fase de control en el que puede ejecutar sus acciones con destreza, suavidad y coordinación, teniendo la confianza de haber conseguido suficiente información.

La figura 7 muestra los tipos de modelos presentados a lo largo del tiempo. En primer lugar, existen los modelos de un régimen, los cuales emplean una ecuación que involucra todas las situaciones que puede presentar un vehículo al conducir. En segundo lugar, se presentan los modelos de 2 regímenes, los cuales emplean modelos que representan una ecuación para un vehículo a flujo libre y otro para seguimiento vehicular. En tercer lugar, se presentan modelos para más de 2 regímenes, tal como los modelos Carsim y Psico-Físicos. En cuarto lugar, se presentan los modelos que emplean una lógica difusa, ya que emplea condicionales



para las respuestas de los vehículos. Por último, se presenta la inteligencia artificial, la cual puede crear movimientos a partir del aprendizaje y adaptación de las situaciones.



**FIGURA 7 – Modelos de Seguimiento Vehicular. Fuente: Adaptado de Diaheng Ni, 2015**

- **Modelo de Pipes**

En el año 1953, Pipes propone un modelo lineal, el cual está basado en el método de un vehículo perseguidor en un solo carril. Asume que la aceleración del vehículo está en proporción con las diferencias de velocidades entre ambos vehículos; es decir, a una distancia segura. Con ello la aceleración queda dada por la siguiente ecuación:

$$a_f(t) = \frac{\lambda}{M} [v_L(t - \tau) - v_F(t - \tau)] \quad (17)$$

Donde “ $v_L$ ” es la velocidad del vehículo líder, “ $v_F$ ” es la velocidad del vehículo perseguidor, “ $M$ ” es la masa del vehículo perseguidor y “ $\lambda$ ” es un factor de sensibilidad. En el modelo, el estímulo es la velocidad relativa y la respuesta es la aceleración. No obstante, el modelo no involucra la velocidad deseada por un vehículo ni la distancia entre los vehículos.

- **Modelo de la General Motors**

En el año 1958, Chandler, en colaboración con otros profesionales, empleó el modelo de Pipes para determinar el tiempo de reacción y la ganancia constante de un vehículo. En términos psicológicos, la teoría de Pipes es representada de la siguiente forma:

$$\text{RESPUESTA} = \text{SENSIBILIDAD} \times \text{ESTIMULO}_{(t)}$$

La respuesta representa la aceleración del vehículo, el estímulo dependerá de la velocidad relativa entre el vehículo perseguidor y el líder, ya que influye en el espaciamiento entre ambos y la sensibilidad trata de representar la forma en la que el conductor manifiesta su preocupación ante un estímulo dado. Realizando varios ensayos, se determinó que el tiempo de reacción de un vehículo es de 1.5s, mientras que la ganancia constante es de  $0.37s^{-1}$ . Este modelo emplea la siguiente ecuación derivada de una respuesta psicológica:

$$a_{2,(t+\Delta t)} = \frac{\alpha}{e_t}(v_1 - v_2) \quad (18)$$

Donde:

$a_{2,(t+\Delta t)}$  = aceleración del vehículo de atrás (2) en el momento  $t + \Delta t$  ( $m/s^2$ )

$\Delta t$  = tiempo de reacción del conductor (s)

$\alpha$  = parámetro de sensibilidad (m/s)

$e_1$  = espaciamiento entre los vehículos en el momento  $t$  (m)

$v_1 - v_2$  = velocidad relativa del vehículo de delante con respecto al eje de aras (m/s)

El valor empleado para el parámetro de sensibilidad es de carácter empírico ya que se emplearon dos vehículos pilotos para experimentos de calibración.

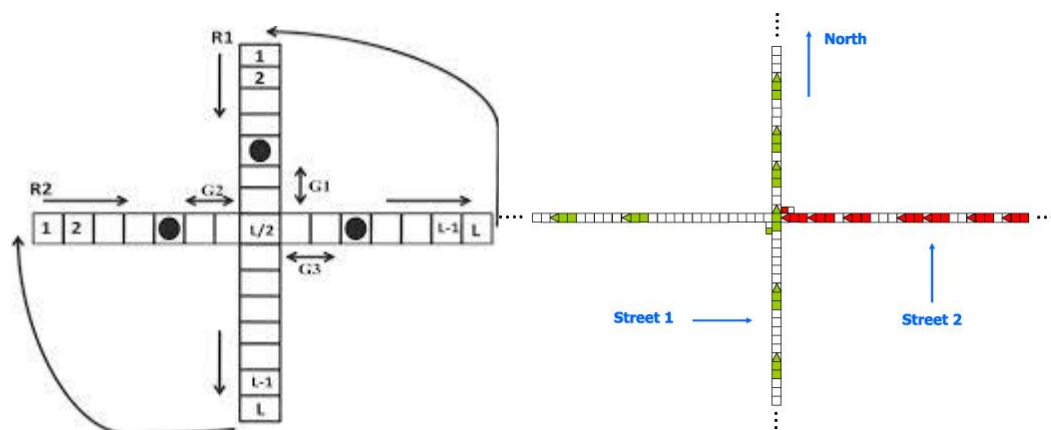
#### • Modelo de los Autómatas Celulares

El modelo es propio del software TRANSIMS, pero su desarrollo se debe a Stanislaw Ulam & John von Neumann en el año 1940. Se basa en dividir la calzada en “secciones de celda” como las mostradas en la figura 8. Para representar el modelo en la realidad es necesario establecer tres principios básicos que rijan su comportamiento.

En primer lugar, el área de estudio será dividido en una cantidad regular de celdas, llamándose grilla de celdas. En segundo lugar, cada celda tendrá un número finito de “estados o condiciones”, el cual dependerá de un instante dado. Finalmente, cada grilla de celdas tendrá dimensiones variables.

De la figura 8 se observan carriles divididos en celdas de dimensiones iguales. Además, cada celda queda definida por el número de vehículos que pueden entrar en ella. Por ejemplo, en la figura de la izquierda, cada celda puede contener un vehículo, mientras que, en la figura de la derecha, se necesitan tres celdas para el mismo fin.

Es necesario definir la velocidad del vehículo, la cual se expresa en unidades de celdas/segundo. Luego, cada celda adquiere unos valores de estado, los cuales dependen de cómo se encuentre en un instante de tiempo (Nagel et al., 1992). Por ejemplo, si no existe vehículo alguno en la celda, los valores de estado se encuentran vacíos. En las celdas donde se encuentran los vehículos, adquirirán valores dependiendo del tipo del vehículo que se presente en ellas.



**FIGURA 8 – Ejemplos de una Intersección con el Modelo de Autómatas Celulares.**

**Fuentes: Marzoug et al, 2014 – Foulaadvand, 2010**

Nagel y Schreckenberg, (1992) aplican este concepto a la teoría de seguimiento vehicular aplicando algunas condiciones. En primer lugar, si la velocidad actual del vehículo es menor a la velocidad máxima del vehículo, este tenderá a acelerar en el siguiente intervalo, aumentando su velocidad una celda por segundo más de la que tenía previamente. En segundo lugar, si la velocidad es mayor que la brecha presentada entre el vehículo líder y uno posterior, se tenderá a desacelerar. Por ejemplo, para una velocidad de 10 celdas/segundo y una brecha de 7 celdas, el vehículo tendrá que desacelerar con la finalidad de no generar una colisión. En tercer lugar, la velocidad decrecerá una celda/hora dependiendo de la probabilidad de que esto suceda, empleando números aleatorios. Por último, se toma en cuenta los movimientos para cada tipo de vehículo, en donde estos se desplazarán empleando velocidades independientes en celdas/hora.

### 2.1.3.2.3. Modelo de Wiedemann

El modelo fue desarrollado por Rainer Wiedemann en el año 1974 en la universidad de Karlsruhe, que es aplicable para tráfico urbano e intersecciones y, posteriormente, se realizó una última actualización en el año 1999, aplicable para autopistas sin intersecciones. Estos dos modelos, Wiedemann 74 y Wiedemann 99, son empleados en el software VISSIM.

Una de las diferencias respecto de los modelos de seguimiento vehicular o de cambio de carril es el estudio de condiciones psicológicas y físicas respecto del comportamiento de los conductores. Por ello es llamado modelo psicofísico. El modelo presenta la capacidad de cambiar de un carril a otro o de iniciar un comportamiento de vehículo perseguidor dependiendo de la situación en la que se presenta.

La forma en la que un conductor maneja un vehículo se presenta de diferentes maneras. Por ello, este modelo considera 4 modos fundamentales de conducir. El primero se denomina

modo de conducción libre, en el cual la velocidad oscilará alrededor de una velocidad deseada o permitida. El segundo se denomina modo de aproximación, en el cual el conductor comenzará a desacelerar ya que existe vehículo posterior que impide alcanzar una aceleración máxima. La desaceleración se dará hasta que la diferencia de velocidades entre ambos vehículos sea igual a cero y/o la distancia deseada entre ellos sea segura. El tercero se denomina modo de seguimiento y surge cuando la distancia entre los vehículos es segura y la diferencia de velocidades entre los vehículos oscila alrededor de cero. Por último, se encuentra el modo de frenado y se produce cuando el conductor es obligado a frenar intempestivamente debido a un cambio brusco de velocidad por parte de un vehículo posterior. También se produce cuando un tercer vehículo interviene de forma brusca en el carril. La figura 9 relaciona los 4 modos explicados.

En la gráfica se observan los ejes de Diferencia de velocidad ( $\Delta V$ ) y Distancia entre vehículos ( $\Delta x$ ). Además, se observa que el eje vertical divide la gráfica en dos zonas. Una donde la distancia se incrementa y otra donde se acorta. En la zona donde la distancia se incrementa, puede interpretarse que el vehículo de adelante se encuentra viajando cada vez más rápido. En el eje  $\Delta x$ , la diferencia entre las velocidades es cero; es decir, ambos vehículos se encuentran viajando a velocidades iguales. En la otra zona, la distancia tiende a decrecer debido a una disminución de velocidad por parte del vehículo posterior. La zona llamada colisión indica que la distancia entre los vehículos es menor a la que el conductor considera como una distancia segura. Si la distancia y velocidades entre los vehículos oscila entre la zona de color blanco, el conductor presentará reacciones inconscientes; es decir, las diferencias entre las velocidades y la distancia entre los vehículos no podrán ser detectadas o anticipadas por el conductor, lo cual dificulta su reacción y provoca una reacción inconsciente. En el área de color verde (zona de la izquierda), la distancia entre los vehículos es muy grande, lo cual puede generar una reacción consciente en el vehículo que se encontraba detrás del vehículo líder, provocando una desaceleración consciente. La zona de la derecha nos muestra que la distancia entre los vehículos está acortándose, generando una reacción en el vehículo líder, provocando que este tenga que desacelerar ya que su velocidad es menor a la del otro vehículo.

La distancia mínima de seguimiento deseada por el conductor para una diferencia de velocidades bajas se encuentra dada por dos distancias. La primera es llamada AX, la cual es la distancia deseada por dos vehículos con una diferencia de velocidades igual a 0. La segunda es BX, la cual indica la distancia mínima de seguimiento que es considerada segura por ambos vehículos.

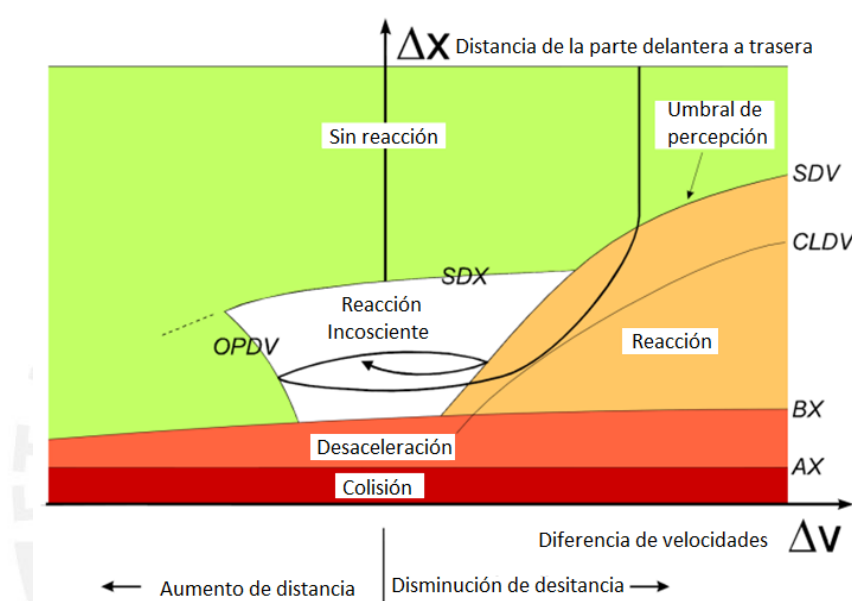
(19)

$\sqrt{v}$  (20)

(21)

$\sqrt{v}$

Se observa que para valores menores a  $ABX$ , el vehículo perseguidor se encontrará en emergencia y para distancias muy grandes, tendrá libertad de movimiento ya que no actuará como perseguidor.



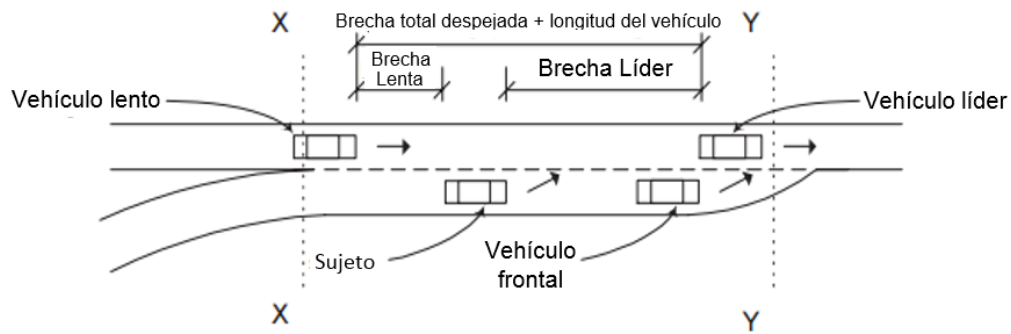
**FIGURA 9 – Modelo de Seguimiento Vehicular. Fuente: Adaptado de PVT AG. 2013**

#### 2.1.3.2.4. Teoría de Adelantamiento o de Cambio de Carril

En la figura 10 se observa un vehículo sujeto que desea cambiar de carril. A su vez, se presenta un vehículo frontal como en la teoría de seguimiento vehicular. Sin embargo, se toma en consideración dos vehículos adicionales: un vehículo líder y un vehículo lento. Además, de la gráfica se observan dos brechas adicionales: brecha líder y brecha lenta.

Esta teoría presenta dos tipos de cambios entre carriles. La primera se denomina Cambio de Carril Obligado (CCO), ya que el vehículo sujeto desea cambiar de carril rápidamente, de lo contrario no alcanzaría su destino. La segunda se denomina Cambio de Carril Discreto (CCD), en la cual el vehículo sujeto desea tener unas mejores condiciones de tráfico, por ejemplo, para adelantar un vehículo frontal, ya que este no presenta una velocidad adecuada para el vehículo sujeto.

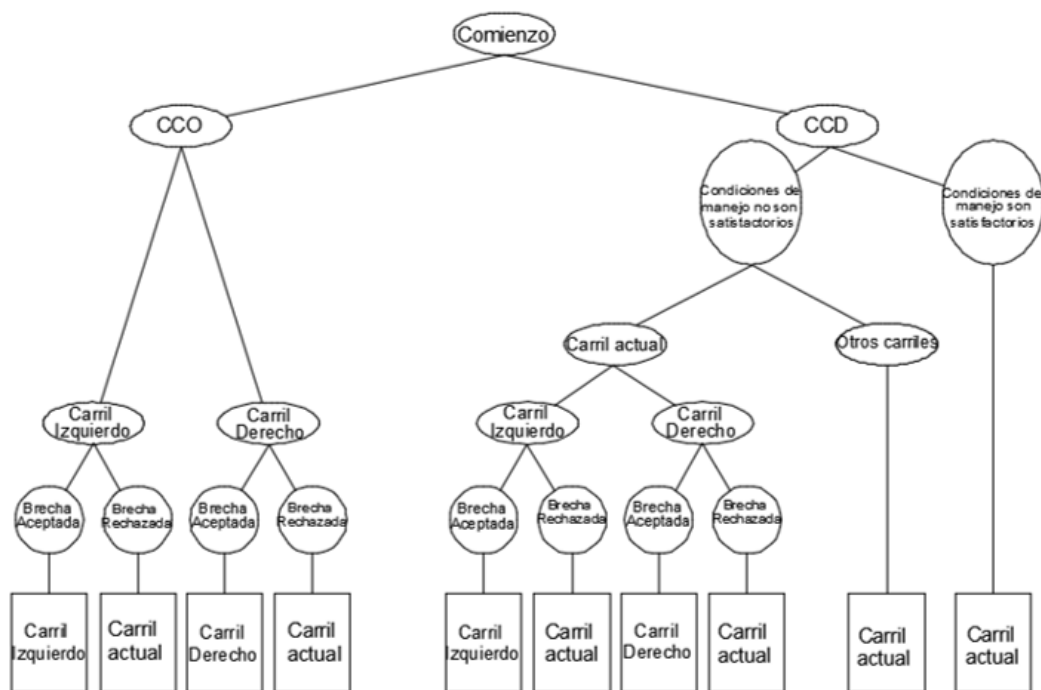
Esta teoría sigue una serie de patrones para determinar el comportamiento de un vehículo. En primer lugar, se distribuyen los vehículos en diferentes carriles, tal como se observa en la figura 10. En segundo lugar, se trata de evitar posibles choques o condiciones de tráfico no deseables, con la finalidad de llegar al destino de forma segura. Por último, se representan las condiciones reales de los movimientos vehiculares.



**FIGURA 10 – Teoría de Adelantamiento de Carril. Fuente: Adaptado de Iftekhar, 1999**

El análisis del vehículo sujeto es mediante un esquema tipo árbol, como se muestra en la figura 11, donde se presentan dos ramas. La primera menciona el cambio de carril CCO. En ella se presentan dos casos, en los cuales se calculará la brecha lenta para ser comparada con la brecha aceptable por el vehículo sujeto. Por ejemplo, para que el vehículo sujeto cambie de carril se presentan dos opciones: doblar a la derecha o izquierda. En cualquiera de los casos se tienen dos posibles respuestas, ir al otro carril o continuar en el mismo. El vehículo debe escoger uno de los dos carriles, ya que, si decide quedarse en su carril, no podrá llegar a su destino. La segunda rama presenta el cambio de carril CCD, la cual evalúa las condiciones del conductor. En ambos casos existe la posibilidad de que el vehículo sujeto pueda quedarse en su carril, ya que no perdería su destino final. No obstante, si el conductor determina que las condiciones no son satisfactorias, se optará por cambiar de carril, y las decisiones posteriores se basarán en criterios de aceptación de brechas, similar a la rama CCO.

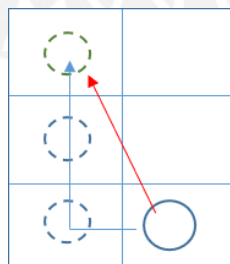




**FIGURA 11 – Árbol de Decisiones para el Modelo de Cambio de Carril. Fuente: Adaptado de Iftekhar, 1999**

- **Modelo Autómatas Celulares**

(Rickert et al., 1995) proponen una teoría basada en el cambio de carril en donde establece que no se puede ejecutar el cambio realizando un movimiento directo, sino se tiene que dar por varios cambios de celda que finalmente coloquen al vehículo en la celda deseada. La figura muestra el cambio de carril que desea usar el vehículo y el proceso real que debe realizar para cumplir dicho deseo.



**FIGURA 12 – Cambio de carril en modelos de autómatas celulares. Fuente: Propia**

Además, propone tres reglas en su modelo. La primera regla ordena observar si existe algún vehículo adelante en mismo carril. La segunda regla manda a revisar si el otro carril presenta una mayor disponibilidad de movimiento. En la tercera regla se debe revisar si existe algún vehículo trasero en el otro carril. Para que el vehículo sujeto decida cambiar de carril, deben cumplirse todas las condiciones siguientes:

- Brecha  $< 1$
- Brecha Líder  $> l_o$
- Brecha Lenta  $> l_{o,back}$
- Rand ()  $< p_{cambio}$

Donde  $l$  es un parámetro que indica la longitud actual respecto del vehículo frontal,  $l_o$  es la longitud actual respecto del vehículo lento y  $l_{o,back}$  es la longitud actual respecto del vehículo líder. Estos parámetros, junto a las condiciones observadas derivan en una serie de características importantes en el modelo. En la tabla 1 se mencionan algunas de las características del modelo.

La primera característica que menciona la tabla 1 es la simetría de los carriles. Si se cumple, entonces la condición 1 será considerada; caso contrario, se obviará. En segundo lugar, se presenta la estocasticidad del modelo, en donde la probabilidad es menor o igual a 1 y el número aleatorio ( $r_i$ ) genera valores menores a 1, entonces existirán valores que cumplan dicha condición como valores que no. Sin embargo, si la probabilidad es igual a 1, la última condición siempre será cumplida, eliminando la estocasticidad del modelo. Por último, si el parámetro  $l_{o,back}$  es mayor a cero, la tercera condición se cumplirá siempre. Sin embargo, si  $l_{o,back}$  es igual a cero, entonces el modelo no podrá considerarla.

**TABLA 1 – Características del Modelo de Autómata Celular. Fuente: Adaptado de Rickert et al., 1996**

Características	Si	No
<b>Simetría</b>	Regla 1 para L→ R	No Regla 1 para L→ R
<b>Estocasticidad</b>	$prob_c < 1$	$prob_c = 1$
<b>Causalidad Lenta</b>	$l_{o,back} > 0$	$l_{o,back} = 0$

#### 2.1.3.2.5. Calibración

Esta etapa trata de ajustar los parámetros generados por el programa de simulación para representar la realidad. Se cambian, normalmente, los parámetros de seguimiento vehicular o cambio de carril.

La calibración puede estimarse en tres etapas: Calibración de Capacidad, Calibración de la ruta escogida y Calibración del Sistema.

- **Calibración de la Capacidad**

Para realizar la calibración, es necesario tomar una serie de datos en campo ya que se necesita conocer la capacidad real de la red de estudio. Por ejemplo, para intersecciones por prioridad se sugiere calcular la descarga de las colas porque estas pueden alterar la capacidad. Para intersecciones señalizadas se recomienda encontrar el flujo de saturación ( $s$ ), el tiempo de verde efectivo ( $g$ ) y la longitud del ciclo ( $c$ ) ya que estas tienen una relación directa con la capacidad.

$$c(\text{capacidad}) = s \frac{g}{c}. \quad (22)$$

Finalmente, para algunos datos que no puedan ser calculados en campo, es posible usar el Manual de Capacidad de Carreteras para estimarlos, pero no es lo recomendable.

Dependiendo de las dimensiones del modelo y el número de parámetros a calibrar se empleará el método más conveniente. Para redes de dimensiones pequeñas se empleará una calibración manual, en la cual se observarán las condiciones de tráfico que puedan detectarse. Además, el margen de error dependerá del modelador. Para dimensiones mayores, se emplean la calibración automatizada, la cual sigue una metodología que reduce el número de corridas manuales, con la finalidad de aproximar de forma óptima el modelo a la realidad.

Para ello, se debe considerar una función objetiva para la calibración, en la que cada parámetro que se necesite calibrar presentará dos valores, uno de campo y otro de la modelación. Debido a esto no podemos tener una función objetiva que represente una modelación exacta. Por ello, es necesario encontrar métodos para relacionar estos valores. En primer lugar, se tiene el método de los errores cuadrados principales (MSE) como se muestra a continuación.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2 \quad (23)$$

Donde  $M_i$  y  $O_i$  son los valores obtenidos del modelo y en campo respectivamente.  $N$  son los números de datos observados. Estos parámetros deben variar respecto de estos límites.

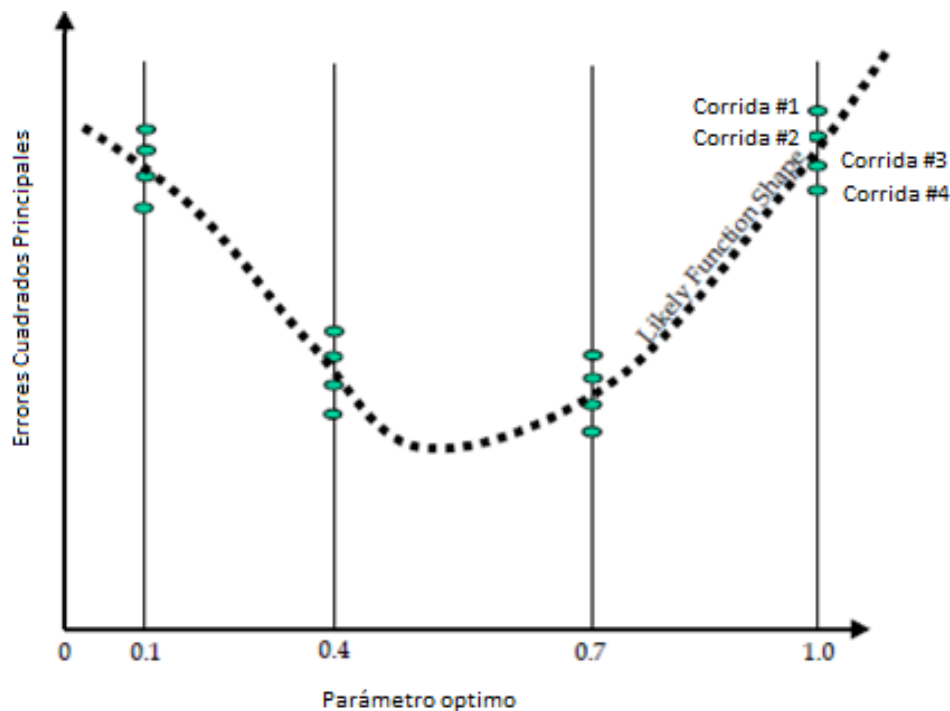
En segundo lugar, se tiene el método GEH, el cual se utiliza para flujos vehiculares en redes grandes y sirve para encontrar las diferencias presentadas tanto en campo con en el modelo.

$$GEH = \sqrt{\frac{(E-V)^2}{(E+V)/2}} \quad (24)$$

Donde  $m$  es el volumen de tráfico del modelo y  $c$  es el conteo real de tráfico. Ambos modelos son empleados principalmente en consultorías.

Luego, se debe hallar el parámetro óptimo, ya que no solo dependerá de las corridas necesarias para tener una confiabilidad aceptable, sino también de los intervalos principales para cada parámetro. La primera forma para encontrar el parámetro óptimo es realizar una búsqueda de parámetro único.

Como se observa en la figura 13 se han seleccionado 4 valores de intervalos y para cada uno de ellos se han generado 4 corridas obteniendo el MSE para cada uno de ellos. Con ello se obtiene la mejor función a lo largo de los periodos de tiempo. También, vemos un valor con un menor MSE, el cual es el parámetro óptimo.



**FIGURA 13 – Parámetro Óptimo. Fuente: FHWA, 2014**

Finalmente se debe hacer la afinación de la calibración. Esta etapa trata de afinar la capacidad predicha para que concuerde con las medidas de la capacidad tomadas en el lugar lo más cerca posible. Es necesario realizar ajustes que afecten la capacidad y que no hayan sido valores de entrada colocados en el software. Estos ajustes no están basados en los comportamientos de los vehículos, por ello deben ser analizados previamente antes de realizar alguna modificación.

- **Parámetros que Afectan la Ruta**

Ya finalizado la calibración de parámetros que afectan la capacidad, es necesario determinar aquellos que afectan las elecciones de ruta de los vehículos. Para ello se realiza una

comparación entre los volúmenes producidos en los modelos y los conteos en campo. El proceso es muy similar a la calibración de la capacidad. No obstante, si la ruta del vehículo es única, entonces no es necesario realizar este paso.

### • Performance de la Calibración

Esta etapa se encarga de comparar los resultados obtenidos con la calibración, con algunos valores definidos en la siguiente tabla tomada de Winconsin DOT. Para cada criterio y medida tomada que se muestra en la tabla se presenta un objetivo de calibración, el cual se sugiere cumplir.

Criterios y medidas	Objetivos de calibración
<b>Flujo horario, Modelo versus Campo</b>	
Flujos Individuales	
Entre 15%, para 700 veh/h < Flujo < 2700 veh/h	>85% de los casos
Entre 100 veh/h, para Flujo < 700 veh/h	>85% de los casos
Entre 400 veh/h, para Flujo < 2700 veh/h	>85% de los casos
Suma de todos los Flujos	Entre 5% de la suma total
Estadística de GEH < 5 por cada flujo individual*	>85% de los casos
Estadística de GEH para la suma total	GEH < 4 para la suma total
<b>Tiempo de viaje, Modelo versus observado</b>	
Tiempo de viaje	
Entre 15% (o 1min, si es mayor)	>85% de los casos
<b>Inspección Visual</b>	
Velocidad individual	
Relacion Velocidad - Flujo aceptable	Al gusto del analista
Cuellos de botella	
Longitud de cola aceptable	Al gusto del analista
<p>* El calculo de las estadísticas del GHE se realiza de la siguiente manera:</p> $GEH = \sqrt{\frac{(E - V)^2}{(E + V)^2}}$ <p>Donde:  E= volumen estimado del modelo  V= registro en campo</p>	

**FIGURA 14 – Criterio de Calibración. Fuente: Adaptado de Wisconsin Dot, 2002**

## 2.2. Moto-taxis

Los orígenes de la moto-taxi se remontan a Japón en el año 1870, cuando el vehículo era impulsado por personas y los pasajeros eran trasladados en carretas (Rahman et al, 2009).

Sin embargo, es recién hacia el año de 1970 en Nigeria donde aparece como vehículo urbano motorizado, como una respuesta a los problemas de transporte urbano y deficiencia en las redes viales (Díaz, et al, 2011).

Este vehículo destaca por su versatilidad en el manejo, su eficiencia en viajes de distancias reducidas y la facilidad con la que se traslada en situaciones de congestión vehicular, evitando las zonas de congestión que pueda encontrar en su trayecto.

Además, fue concebido como un medio de transporte público alternativo a los ya convencionales (buses, taxis, coasters, entre otros), cuyo objetivo, desde un inicio, fue ser un complemento para los demás sistemas de transporte de tal manera que sea una alternativa rápida y más económica en el traslado de los usuarios al momento de realizar sus quehaceres diarios, como viajes a centros de estudio o traslado de víveres, entre otros (Díaz, et al, 2011). Este vehículo es conocido en diferentes países del mundo por prestar un servicio de puerta a puerta, que facilita el traslado de las personas en tramos cortos dentro de una ciudad, lo que contribuye a reducir el uso de vehículos privados (Akshay et al., 2012)

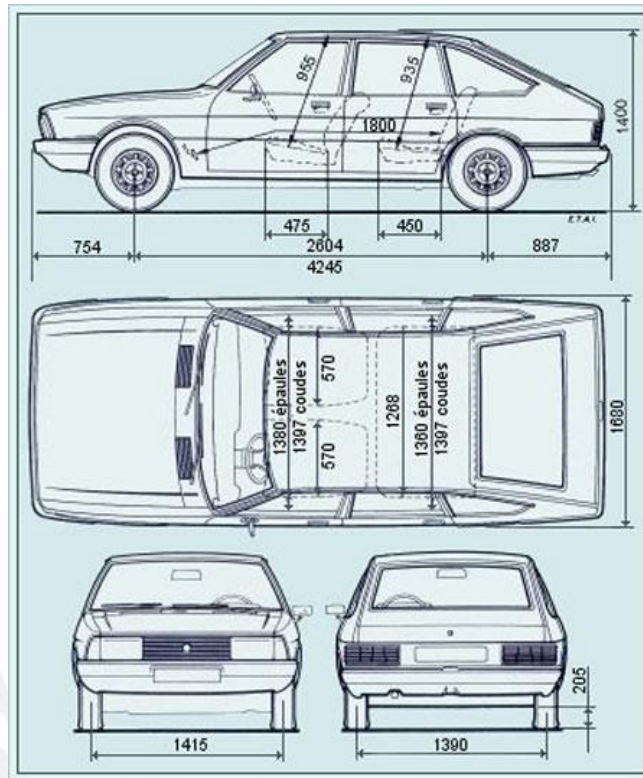
Gran parte del presente estudio es comprender el comportamiento de estos vehículos, para ello es importante conocer sus características geométricas y técnicas. A continuación, se hace mención de ellas, esto nos permitirán entender mejor su operatividad y funcionamiento.

### **2.2.1. Características generales**

Este vehículo cuenta con dos ambientes claramente diferenciados. La parte delantera consta de una cabina simple, destinada para el conductor. En ella podemos encontrar el timón, el tablero para el tacómetro y el indicador de combustible, el pedal de frenado y un asiento bastante sencillo. En la parte posterior, podemos encontrar una cabina para los pasajeros, que cuenta solo con un asiento simple donde pueden entrar sentados un máximo de 3 personas adultas.

En cuanto a sus dimensiones, las moto-taxis son considerados vehículos pequeños, ya que no ocupa un área mayor a los  $3.5\text{m}^2$ . Como se puede apreciar en la figura 15, un vehículo convencional ocupa, aproximadamente, un área de  $7.0\text{m}^2$ , el doble del espacio que ocupa una moto-taxi. Esta es una de las razones por las cuales este tipo de vehículos muestra un comportamiento particular, dos moto-taxis pueden ocupar el mismo espacio que un automóvil convencional. Esto sumado al comportamiento agresivo de los conductores de estos vehículos, suele generar congestionamiento vehicular en algunas intersecciones.





**FIGURA 15 – Dimensiones de un automóvil convencional. Fuente: Romero, 2012**



**FIGURA 16 – Dimensiones de un moto-taxi. Fuente: Bajaj, 2015**

Una de sus características principales es el número de llantas por eje, en el eje delantero solo cuenta con una llanta, mientras que en el eje posterior cuenta con dos, dando la impresión de tratarse de un triciclo. Esta característica asimétrica que posee este tipo de vehículos les ha hecho acreedor a muchas críticas por tener cierta inestabilidad en los giros bruscos y frente a imperfecciones en la vía. Debido a esto, y sumado al comportamiento de los conductores, hay quienes los consideran como un medio de transporte inseguro aunque, de acuerdo a un estudio realizado en el 2012 (Akshay et al, 2012), estos vehículos podrían ser considerados como seguros por su bajo peso y baja velocidad de circulación. A esto se debe añadir el hecho de que no todas las versiones de las moto-taxis cuentan con una carcasa completa; Por

ejemplo, la versión Estándar no posee puertas para el conductor o los pasajeros, mientras que las versiones Lujo y Súper lujo sí poseen puerta para los pasajeros y es solo la ultima la que posee puerta en la cabina del conductor (Autodisa, 2012).

Hasta hace algunos años se podía apreciar en el vehículo un solo faro; sin embargo, en los últimos modelos, desde el año 2014, se cuenta con dos faros en la carcasa delantera, que también ha sido reforzada para reducir daños en caso de accidentes. Esto aumenta la detección de las moto-taxis durante la noche, ya que antes no eran percibidas por los conductores de otros vehículos y se generaban accidentes por estas razones.



**FIGURA 17 – Modelo antiguo de moto-taxi. Fuente: Propia**

### **2.2.2. Características técnicas**

En la tabla 2 se puede apreciar algunas de las características técnicas más comunes en este tipo de vehículos. Se puede notar que el vehículo es impulsado por un motor de un cilindro de cerca de 200cc, funciona con una caja de 4 velocidades; adicionalmente, se puede agregar la opción de marcha en retroceso; logra alcanzar una velocidad máxima de 65 km/h y opera con una potencia de aproximadamente 9 HP a 5200 RPM. En sus versiones más recientes puede alcanzar los 11 HP a 5000RPM (Bajaj, 2015).

**TABLA 2 – Ficha técnica de moto-taxi. Fuente: Adaptado de Autodiza, 2012**

<b>INFORMACIÓN DEL MOTOR</b>	
Motor:	4 tiempos enfriado por aire forzado (turbina)
Potencia:	8.72 HP @ 5200 rpm
Cilindros:	Un cilindro (198.75 cc)
Lubricación:	Positiva con cárter húmedo
Sistema de encendido:	Electrónica variable (CDI) 12v
Velocidad máxima:	65 km/h
<b>PRESENTACIÓN DE VENTA</b>	
Fórmula rodante:	3×2
Pesos:	Bruto: 670 kg / Neto: 356 kg / Carga: 314 kg
Nº de asientos:	03 (tres)
<b>SEGURIDAD TÉCNICA</b>	
Sistema de arranque:	Eléctrico y manual por palanca.
Sistema de embrague:	Multidisco en baño de aceite.
Sistema de transmisión:	4 velocidades / Retroceso (Opcional)
Sistema de frenos:	Delantero: Hidráulico de tambor.
	Posterior: Hidráulico de tambor.
	Parqueo: Mecánico en ruedas posterior
Nº de ruedas:	Tres (con 02 ejes)
	Delantero: 4.00×8. 4/6 PR
	Posterior: 4.00×8. 4/6 PR
Sistema de suspensión:	Delantero: Sistema tipo McPherson independiente
	Posterior: Amortiguador y resorte

## CAPITULO 3: METODOLOGÍA

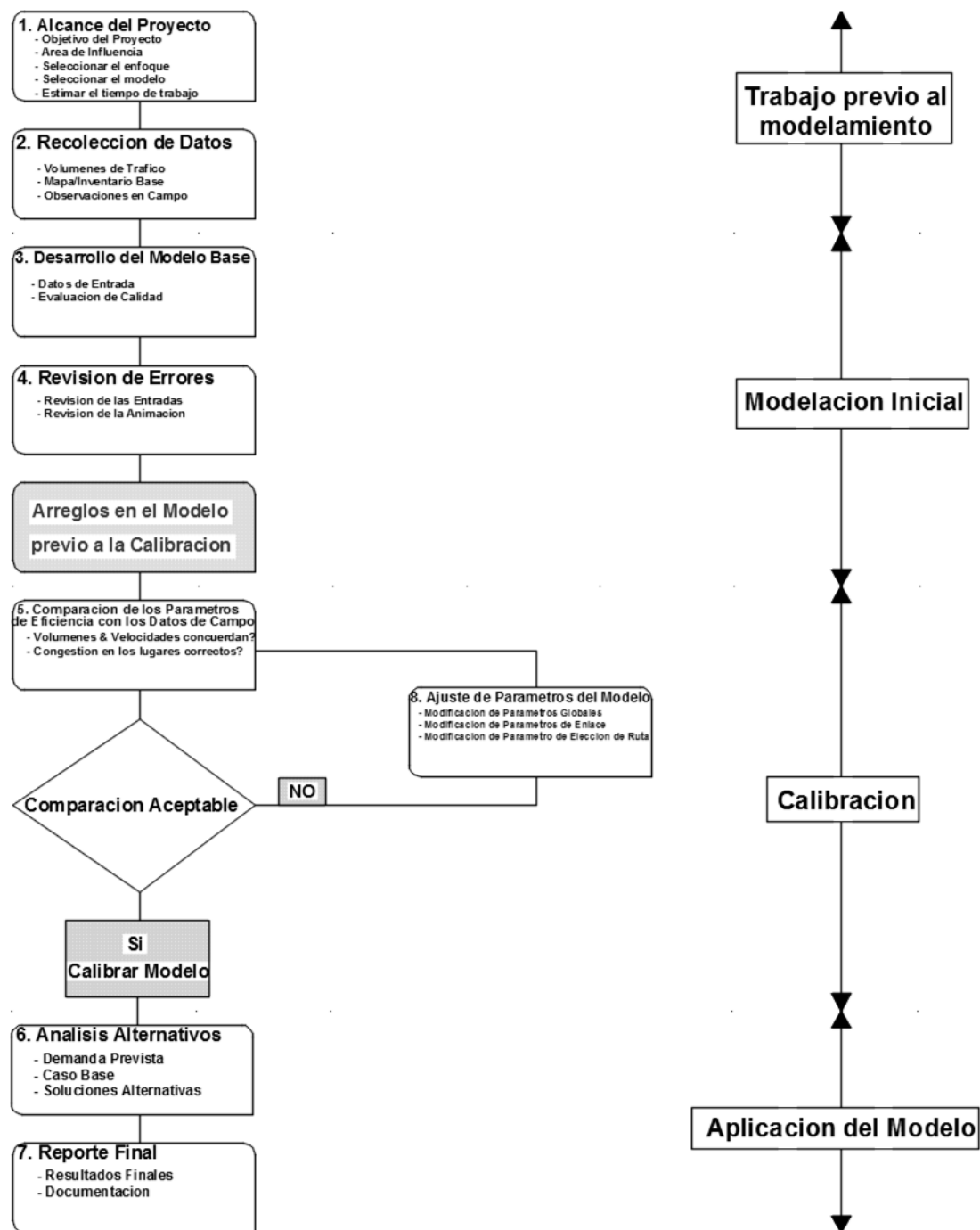
En el presente estudio se realizará el modelamiento de una red vehicular que consta principalmente de vehículos atípicos como las moto-taxis. La interacción entre los vehículos y los diferentes comportamientos presentados por cada conductor hace necesario emplear un modelo de carácter microscópico, ya que será necesario analizar al vehículo y su conductor. Además, la dimensión de la red de estudio permite adoptar este modelo, debido a que, al ser una red con un área pequeña, permite estudiar cada vehículo presente en el análisis.

Para poder analizar la interacción entre las moto-taxis es necesario escoger una zona donde su presencia sea permanente. Sin embargo, en la red de estudio escogida, no solo se presentan este tipo de vehículos, también existen vehículos de transporte privado y público, como los micro-buses. Además, la interacción con los peatones que circulan por la zona generará mayor conflicto en la zona de estudio.

Es necesario realizar los estudios de campo en una hora en la que se pueda representar el flujo real de la red de estudio. Por este motivo, se ha elegido un día domingo por la mañana, aproximadamente entre las 10 y 12 am, para la recolección de datos puesto que la zona de estudio se encuentra muy cerca al mercado del distrito de Villa María del Triunfo y en esas horas la zona se vuelve muy concurrida y fluida a la vez.

Para poder realizar la simulación será necesario tomar datos de la zona en estudio y así obtener los parámetros necesarios que solicita el programa Vissim para poder representar el comportamiento de las moto-taxis. Para ello, se hará un registro fílmico de la intersección en cuestión, desde una planta elevada proporcionada por un pequeño hospedaje ubicado a cerca de la intersección. Con ayuda del registro fílmico se procederá a realizar la calibración del software, por lo que se requerirá de al menos dos horas de grabación. Luego se procederá con la validación del modelo, para lo cual se necesita registrar datos de la zona de estudio en un día y horario diferente a la recolección realizada previamente.

La figura 18 muestra la metodología sugerida por la FHWA para la elaboración de un modelo de micro-simulación. Como primer paso, se debe definir el alcance del proyecto ya que el tiempo, costo, calidad de servicio y la búsqueda de información son variables fundamentales que intervienen en el mismo y podrían detener el desarrollo de un proyecto. El alcance está dividido en alcance geográfico y el alcance temporal. El manual Toolbox Analysis Volumen III (FHWA, 2004) proporciona una guía para poder definir estos tipos. Con respecto al primero, se indica que, si se desea modelar una determinada área, entonces se debe modelar una mayor con la finalidad de tener un modelo más preciso.



**FIGURA 18 – Metodología de un Proyecto de Micro-simulación. Fuente: Adaptado de FHWA, 2014**

El segundo paso está relacionado a la forma de recolectar los datos para empezar a construir el modelo. Primero se deberán obtener los datos de la geometría y de control, donde se incluyen la regulación de la intersección. Por otro lado, tenemos los datos demandados, en los cuales se encuentran los volúmenes entrantes, matrices origen-destino y las características vehiculares; por ejemplo, cuántos camiones se presentan o cuántos vehículos



particulares hay en el lugar. Además, debido a la gran cantidad de variables presentes en los modelos de simulación, es necesario realizar una calibración, es por ello se necesitará tomar datos para realizarla posteriormente.

Las características físicas y mecánicas de las moto-taxis no se encuentran contempladas en el software VISSIM 8.0. Por este motivo, es necesario realizar un estudio de campo. Entre las medidas requeridas por el software se encuentran las aceleraciones y velocidades máximas y deseadas, las cuales son características propias de cada vehículo. Para ello se empleó un dispositivo GPS (Solo GPS Last Timer), el cual registra datos de aceleración y velocidad (entre otros) para distancias entre 100 y 500 metros. El registro de datos recolectado por el GPS es llevado al software Race Analysis Studio con la finalidad de obtener los datos de aceleración, así como de velocidad.

En el tercer paso se empieza a construir el modelo con los valores recolectados. En primer lugar, se crean “Links”, los cuales nos permiten colocar el número de vías y carriles que van a ser empleados en nuestro estudio.

Es importante tener definida la geometría del lugar a analizar para posteriormente colocar datos de control de tráfico como los semáforos, señalizaciones, paradas, y otros existentes en la intersección. Las demandas y comportamientos de los vehículos también son variables que deben ser añadidos al software. Además, se debe desarrollar e implementar un control que asegure la calidad del modelo y reduzca la cantidad de errores introducidos en el modelo (FHWA).

En el cuarto paso, se verificarán los errores propios del software, valores de entrada colocados, y conflictos observados en la animación. Este paso es importante para tener una exactitud en del modelo respecto del tránsito real. Se debe evitar que existan interferencias entre los vehículos y peatones que puedan significar accidentes en la vida real.

El quinto paso es la calibración del modelo, que tiene como objetivo ajustar una serie de parámetros indicados por el software y por el tipo de área a analizar. Entre la información a calibrar podemos encontrar el conteo de tráfico vehicular, tiempos de viaje, velocidades, capacidades, datos del flujo de saturación, demoras y colas. Esta etapa es fundamental para poder representar mejor las condiciones de la red de estudio. Además, debe realizarse porque los modelos de micro-simulación no incluyen todos los factores posibles que puedan afectar la capacidad y las condiciones de tráfico y es necesario encontrar las diferencias entre el modelo y la realidad para poder reflejar la realidad con un 95% de confianza mediante la simulación.



Luego de realizar la calibración se procede a validar el modelo. El procedimiento es similar al de la calibración, pero esta etapa busca confirmar que el modelo es una fiel representación de la zona en estudio en cualquier momento de un día aleatorio.

Una vez calibrado y validado el modelo, se procede con el sexto paso llamado Análisis Alternativos, donde primero se creará un caso base de demanda, la cual deberá ser comparada con varias alternativas del proyecto generadas por el número de corridas realizadas del modelo. Se archivarán aquellas que cumplan con los requisitos, para finalmente generar las salidas respectivas. En el presente estudio, no se realizará este paso ya que realizar una propuesta de solución a los problemas presentados en el área de estudio no forma parte del alcance establecido inicialmente.

La última tarea se denomina Reporte Final, en la cual se documentarán todos los resultados y conclusiones obtenidos para una posterior toma de decisión sobre el proyecto.



## CAPITULO 4: MODELACIÓN DE MOTO-TAXIS

En el presente capítulo se mostrará el proceso seguido y detallado en el Capítulo 3. Del mismo modo se presentarán el procesamiento de los datos recolectados, su ingreso al software, los resultados de la micro-simulación, su interpretación y análisis. Finalmente se dará respuesta a las hipótesis planteadas al inicio del documento, junto a su debida justificación y comentarios finales.

### 4.1. Datos recolectados

#### 4.1.1. Volumen de vehículos en la intersección

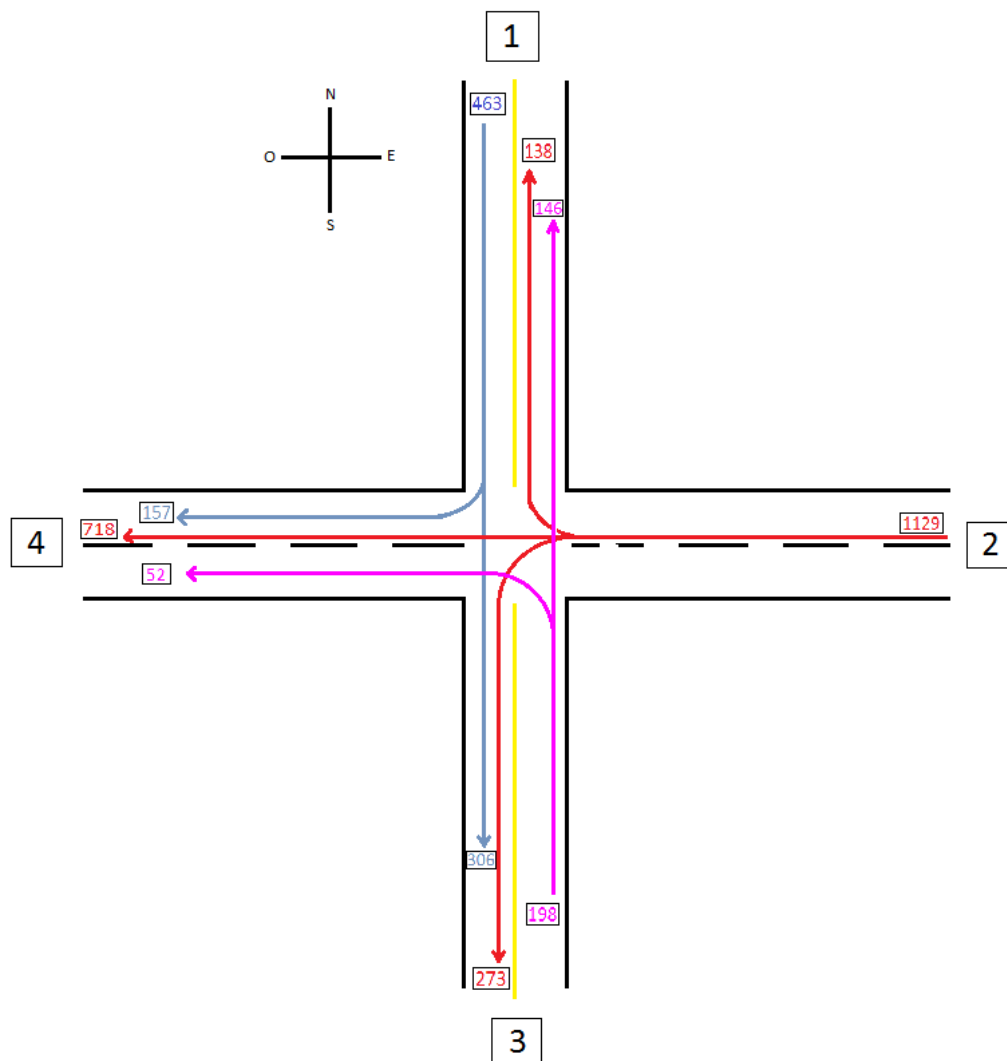
Para poder realizar el registro de los datos necesarios primero se determinó el lugar y el momento adecuado para la recolección. El distrito de Villa María del Triunfo cuenta con una gran cantidad de flujo de moto-taxis, por lo que se eligió una intersección cercana al mercado San Francisco. En cuanto a la fecha y horario elegidos, se decidió grabar en un periodo de tiempo en que la circulación de moto-taxis sea mayor a la de los demás vehículos. Por lo tanto, se eligió el día domingo 24 de enero entre las 10 am y las 11 am, horario en el que muchas familias hacen las compras del hogar. Esto nos permitió tomar en cuenta tanto el comportamiento de las moto-taxis como de los vehículos particulares, de servicio público y los peatones.



**FIGURA 19 – Orden establecido a las direcciones de la intersección. Fuente: adaptado de Google Maps.**

A continuación, se estableció un orden en las direcciones existentes, para así poder evitar confusiones al momento de hacer el conteo vehicular. De esta manera, se le asignó al Norte

la dirección 1; al Este, la 2; al Sur, la 3 y al Oeste, la 4. En la figura 19 se puede apreciar de manera más clara el orden mencionado. También es importante que se tomen en cuenta todos los movimientos posibles en la zona de estudio. Para el caso particular en estudio se encontraron 7 opciones de movimiento en total, siguiendo el orden establecido previamente, las opciones serían las siguientes: 1-3, 1-4, 2-1, 2-3, 2-4, 3-1 y 3-4. En la figura 20 se puede apreciar el flujograma de la intersección estudiada.



**FIGURA 20 – Flujograma de la intersección estudiada (veh/h). Fuente: Propia**

Al momento de realizar el conteo se procedió a diferenciar los diferentes tipos de vehículos presentes en la intersección estudiada, tales como autos, moto-taxis, microbuses, combis y motos. Del mismo modo, el conteo se realizó para cada dirección. Luego de esta diferenciación, a cada tipo de vehículo se le hizo el seguimiento de sus rutas dentro de las siete posibilidades mencionadas previamente. A manera de resumen, se registró un total de 471 automóviles, 1169 moto-taxis, 74 microbuses, 56 combis, 7 motos lineales y 13 camiones. Como se puede apreciar en la tabla 3, la mayor cantidad de vehículos, tanto en su

diferenciación por tipo como por dirección, son las moto-taxis. Esto nos da la certeza de haber elegido adecuadamente la intersección, ya que se puede apreciar mayor interacción entre moto-taxis y los demás vehículos.

**TABLA 3 – Cantidad de vehículos registrados en la intersección. Fuente: Propia**

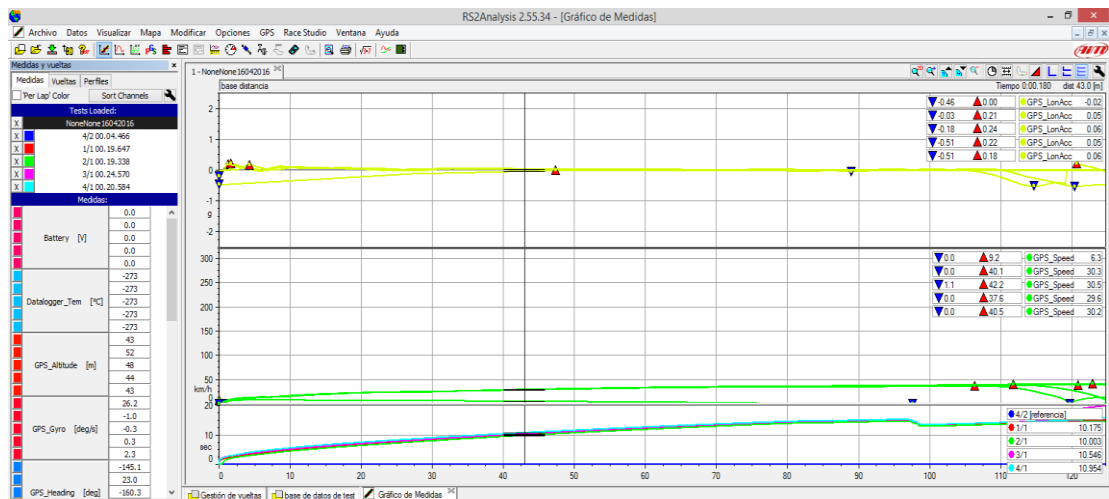
	1-3	1-4	2-3	2-4	2-1	3-1	3-4	TOTAL
AUTO	104	44	21	212	30	46	14	471
MOTO-TAXI	181	104	251	411	107	84	31	1169
MICROBUS	8	3	0	52	0	6	5	74
COMBI	10	5	0	31	1	8	1	56
MOTO LINEAL	3	1	0	0	0	2	1	7
CAMION	0	0	1	12	0	0	0	13
	306	157	273	718	138	146	52	

#### 4.1.2. Aceleración máxima y deseada

Las diferencias entre la aceleración máxima y deseada nacen a partir del peso del vehículo, la potencia de su motor y las pendientes presentes, tanto en la intersección analizada como en la intersección donde se registraron los datos de la aceleración. Por ejemplo, para vehículos pesados, en una pendiente pronunciada, la aceleración máxima será mayor, debido al esfuerzo que necesitará el vehículo para subir la pendiente.

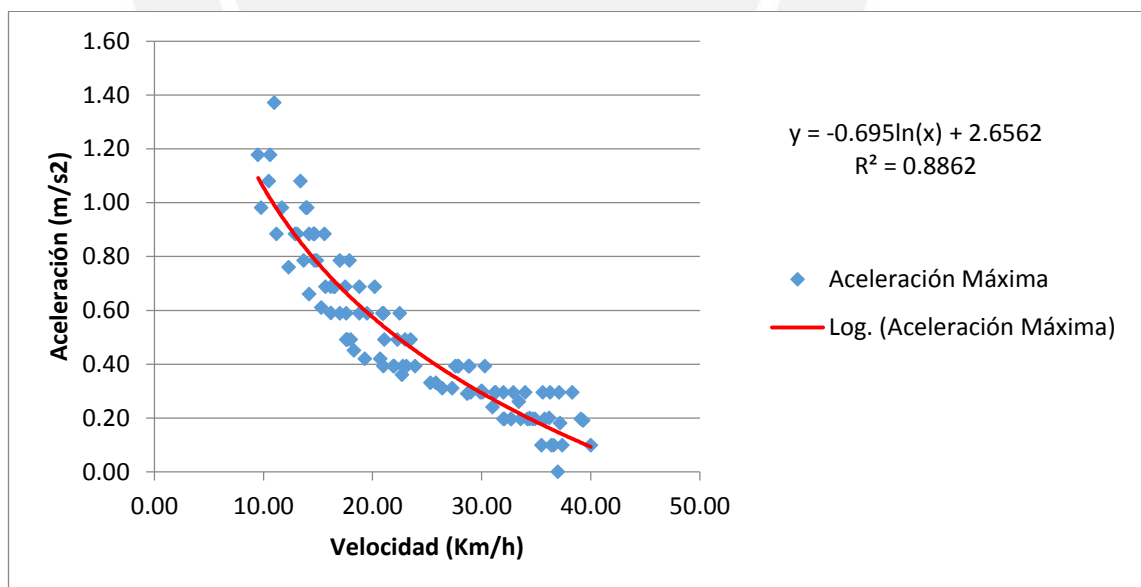
En nuestro caso, al tratarse de moto-taxis, tanto la aceleración máxima como deseada no deberán ser diferentes debido a que la intersección donde se realizó el estudio de aceleraciones no presentaba pendientes. Además, considerando que se trata de un vehículo de poca potencia y peso, tanto la aceleración deseada como la aceleración máxima serán consideradas iguales.

El registro de aceleraciones se realizó mediante el uso directo de las moto-taxis y apoyados de un GPS Lap Timer. Estos fueron incorporados en la computadora mediante el software RS2 Analysis 2.55.34. En la figura 21, se observan las gráficas de aceleración y velocidad respectivamente, se puede apreciar que todas las muestras analizadas se encuentran en valores muy cercanos.



**FIGURA 21 – Grafica de Aceleración Máxima. Fuente: Propia**

Los datos obtenidos se tabularon en Excel y se realizó un diagrama de dispersión. A partir de estos datos, se realizó una regresión logarítmica para obtener una fórmula que represente estos valores, como se aprecia en la figura 22. Se puede observar que el comportamiento de las moto-taxis es el esperado. Para velocidades bajas se necesita mayor aceleración que a velocidades altas. La comparación con un vehículo convencional se vuelve casi obligatoria. Las características físicas y técnicas de la moto-taxi hacen que para alcanzar cierta velocidad tenga que acelerar más que un vehículo convencional.

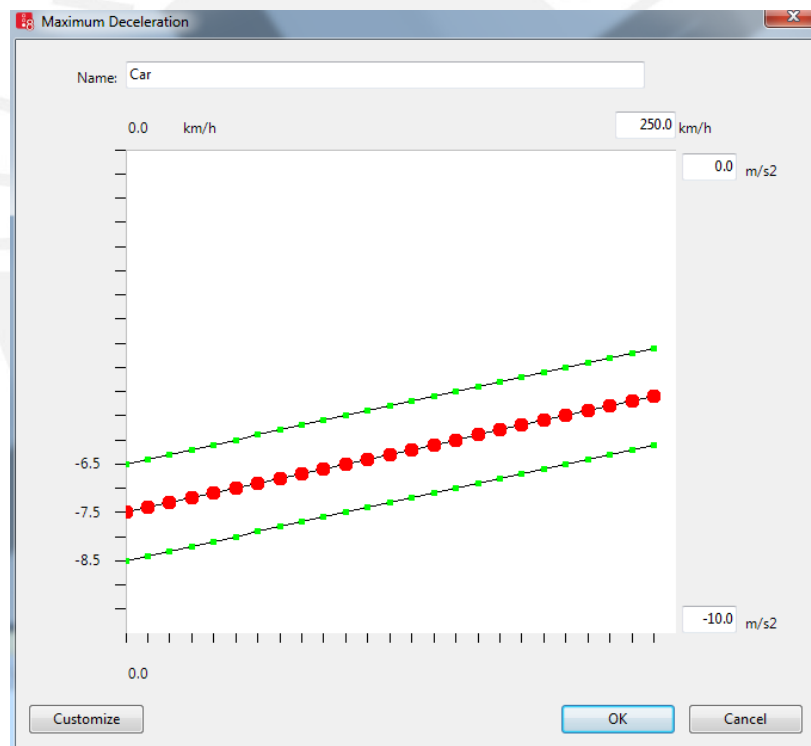


**FIGURA 22 – Aceleración máxima. Fuente: Propia**

#### 4.1.3. Desaceleración máxima

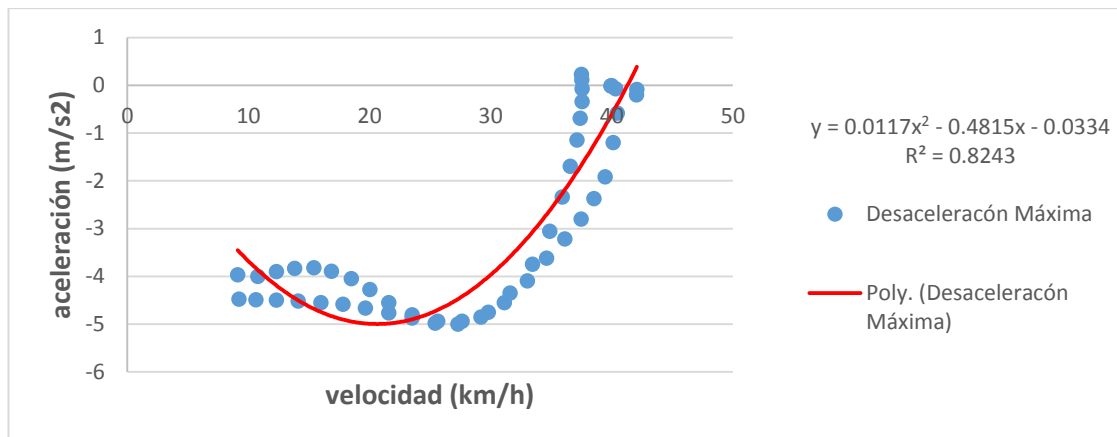
Para determinar las desaceleraciones se utilizó el mismo procedimiento que para las aceleraciones. El equipo GPS/acelerómetro registró los datos y se tabularon luego en Excel. El diagrama de dispersión elaborado a partir de estos datos nos muestra un comportamiento muy diferente al de los automóviles, que presenta una desaceleración lineal, como se puede apreciar en la figura 23. Sin embargo, la figura 24 nos indica que las moto-taxis presentan una desaceleración casi polinómica. Este comportamiento puede ser producido por las maniobras realizadas durante los tiempos de frenado, que pueden disipar o incrementar la desaceleración.

Como se esperaba desde un inicio, la figura 24 nos muestra que las moto-taxis tienen un comportamiento particular que amerita ser estudiado. Al momento de ingresar esta información al software, se tratará de mantener la curva obtenida para que al iniciar la simulación se pueda apreciar el comportamiento de las moto-taxis lo más real posible.



**FIGURA 23 – Desaceleración máxima de automóvil. Fuente: Vissim 8.0, 2016**

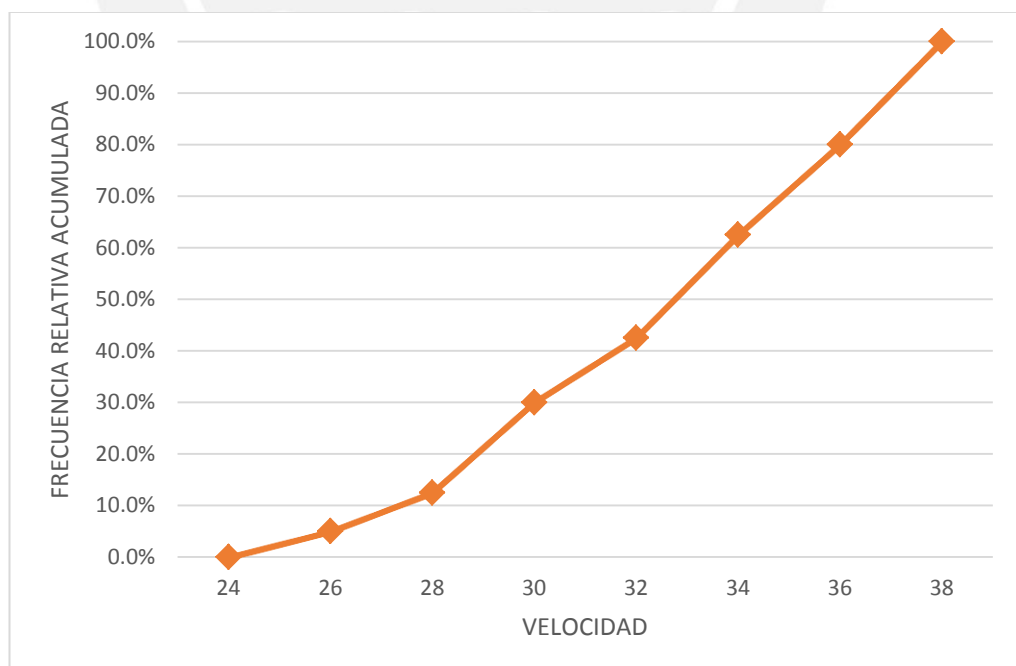




**FIGURA 24 – Desaceleración máxima de moto-taxi. Fuente: Propia**

#### 4.1.4. Histograma de Velocidades

Otra información necesaria para observar el comportamiento real de los moto-taxis, son las velocidades deseadas. Para ello se procedió a registrar las velocidades que alcanzaban las moto-taxis en un tramo recto sin que se vean influenciados por ningún otro vehículo o elemento presente en la red vial. De los valores obtenidos se realizó un histograma de velocidades para ser incorporados a nuestro modelo base. De la distribución obtenida, podemos observar en la figura 25 que la mayor cantidad de vehículos presentan velocidades entre los 33-35 km/h



**FIGURA 25 – Grafica de frecuencias acumuladas. Fuente: Propia**

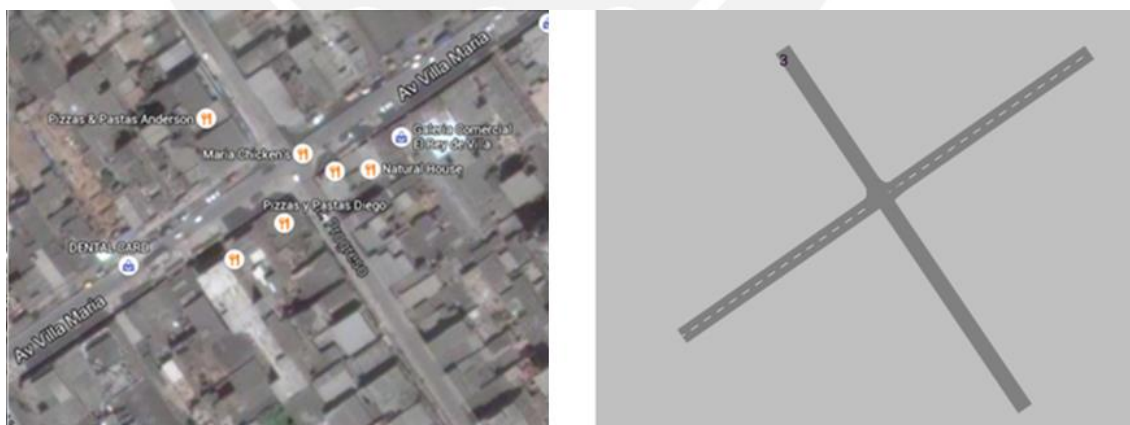
## 4.2. Modelo base

El contenido presentado en este acápite contiene la información revisada y verificada luego de la etapa de revisión de errores. Es importante destacar esto para evitar confusiones posteriores.

### 4.2.1. Elaboración de la intersección

Como primer paso, se debe construir la geometría de la intersección seleccionada, por lo que se importó, de Google Maps, una imagen de dicha intersección. Sobre esta imagen se generan los links y giros pertinentes de acuerdo a la realidad. Para representar los cambios de acceso se utilizaron 7 puntos de giro, de tal manera que se genere una curvatura aceptable y lo más parecido a lo observado en campo.

Para crear los links es necesario conocer las dimensiones de cada carril y el número de vías presentes en la intersección. La primera vía creada es la Av. Villa María del Triunfo que cuenta con un solo sentido y dos carriles de 3 m de ancho cada uno. Luego, se creó el Jr. Progreso, con un solo sentido y un carril de 3 m de ancho. La tercera vía presente es similar a la segunda, excepto por ser en sentido inverso, a esta la llamamos Jr. Progreso2. Los giros fueron creados a partir de las rutas observadas en el video. Como se mencionó anteriormente, la figura 20 muestra todas las rutas posibles, por lo que los giros creados debían permitir el total de maniobras registradas. En la figura 26 se puede apreciar la imagen ingresada al software y los links creados a partir de ella.



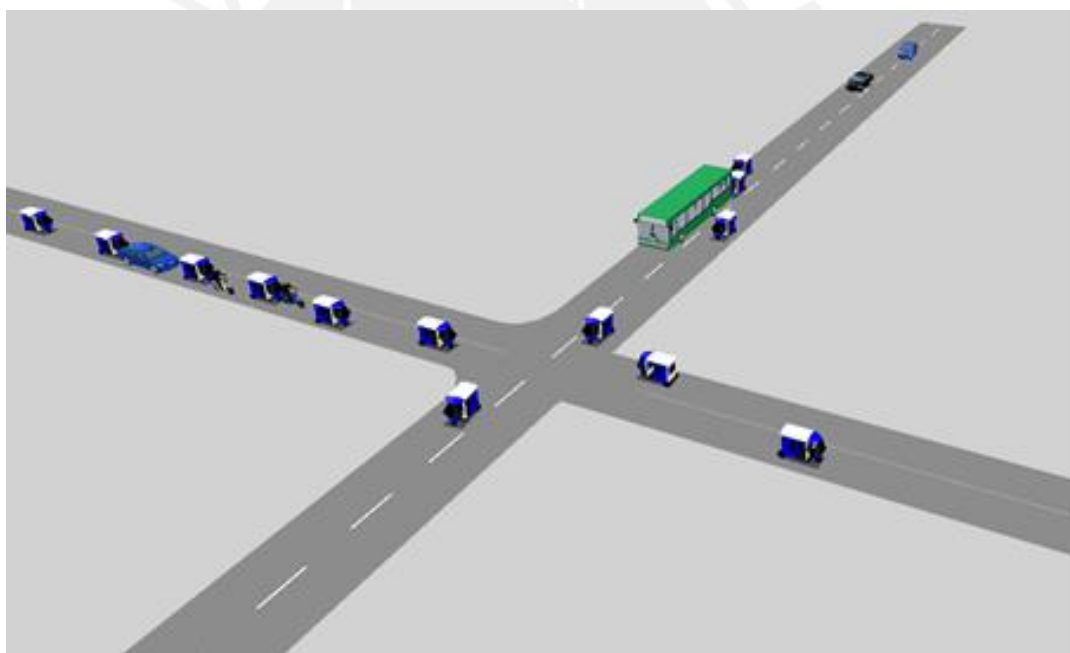
**FIGURA 26 – Intersección Av. Villa María con Jr. Progreso (Modelo de Google Maps y del software VISSIM 8.0). Fuente: Propia**

En segundo lugar, se debe observar las particularidades de la intersección a estudiar para poder representarlas en el programa y mantener el realismo. En la vía principal se pueden apreciar zonas de paradas, que son generadas, en su mayoría, por buses que se detienen para

la subida o bajada de pasajeros. Por ello, con el objetivo de tener un modelo que considere esta situación, se ha colocado una señal de PARE que obligue solo a los buses a detenerse por un lapso de tiempo promedio de 5.9 segundos obtenidos a partir de la tabla 4, que muestra los tiempos recolectados del registro fílmico. De esta manera se simula el paradero informal presente en la intersección. En la figura 27 se puede apreciar como un microbús se detiene en la señal de PARE ingresada al software.

**TABLA 4 – Tiempos de parada de buses. Fuente: Propia**

Tiempos de parada de buses				Promedio
7.9	6.4	5.2	5.1	5.9
7.0	5.6	4.3	5.8	
6.3	5.4	4.8	5.4	
7.2	6.2	5.2	6.0	
5.9	6.3	4.7	6.4	



**FIGURA 27 – Parada de buses. Fuente: Propia**

Finalmente, se coloca el contador de tiempo de viajes, que registra el tiempo en que un vehículo se demora en ir de un punto fijado a otro. Es importante que se registre el tiempo que demora en cruzar la intersección, ya que de lo contrario no se estaría analizando la intersección propiamente dicha. Por ejemplo, si se coloca el contador en la avenida principal, antes de la intersección, los resultados obtenidos no serían de utilidad, ya que no se busca analizar el comportamiento de la avenida principal, sino de la intersección, El contador se coloca en la Av. Villa María del Triunfo y mide el tiempo en una distancia de 18 metros.

#### 4.2.2. Datos de entrada

En esta etapa se procede a ingresar los valores de entrada al software, tales como la composición de vehículos y volúmenes. Es importante indicar que cualquier error cometido al momento de ingresar los datos afectara directamente en los resultados obtenidos puesto que estos parámetros son la base para el modelamiento de cualquier red de tráfico.

La composición vehicular fue calculada con ayuda de la tabla 3, en la cual se observan todos los tipos de vehículos que circularon en la intersección y su elección de ruta. Podemos observar, también, un detalle en particular sobre las rutas que toman los vehículos que circulan por la Av. Villa María del Triunfo, especialmente para los microbuses, combis y camiones. Los tres tipos de vehículos van de frente; además, solo las combis giran a la derecha y los camiones a la izquierda.

Para lograr esta condición particular, se han creado dos composiciones vehiculares para la avenida en cuestión. A la composición “2 – 4” se le asignó solo los automóviles y las moto-taxis, mientras que a la composición “2 – 4 público” se le asignó las microbuses, combis y camiones. Al hacer esto se divide en dos el volumen total de vehículos que ingresan a la intersección por esta avenida, por lo que se debe mantener el orden para evitar confusiones en los siguientes pasos. Con este artificio, se logra mantener la condición mencionada en el párrafo anterior y así evitar que los vehículos en mención realicen movimientos que no se dan en la realidad. En la tabla 5 se muestra la demanda de los vehículos por cada vía de acceso.

**TABLA 5 – Composición vehicular de la intersección. Fuente: Propia**

Nombre	Auto	Moto-taxi	Microbús	Combi	Moto lineal	Camión
1 - 3	0.320	0.616	0.024	0.032	0.009	-
2 - 4	0.255	0.745	-	-	-	-
2 - 4 público	-	-	0.536	0.330	-	0.134
3 - 1	0.303	0.581	0.056	0.045	0.015	-

Una vez que la composición vehicular esta definida se procede a ingresar los volúmenes para cada vía. De la tabla 3 se obtienen estos valores, así se tiene que para la Av. Villa María del Triunfo, y manteniendo la división realizada anteriormente, se tiene un volumen de 1032veh/h que incluye automóviles y moto-taxis y 97 veh/h de microbuses, combis y camiones. Por otro lado, el Jr. progreso y Jr. Progreso2 se tienen 198 veh/h y 463 veh/h respectivamente. A cada uno de las vías se le asigna la composición vehicular correspondiente, de lo contrario no se estarían reflejando los flujos relativos reales. Debido a

que se trata de una intersección simple y sin mayor complejidad, se elige el tipo de volumen exacto para cada uno de los accesos.

**TABLA 6 – Volúmenes presentes en la intersección. Fuente: Propia**

Vía	Volumen	Comp. Vehicular
Av. Villa María del Triunfo	1032.0	2 - 4
Av. Villa María del Triunfo	97.0	2 – 4 publico
Jr. Progreso	198.0	3 - 1
Jr. Progreso2	463.0	1 - 3

#### 4.2.3. Elección de Ruta

El modelo a representar mediante el software VISSIM 8.0 debe reflejar datos muy similares a la realidad. Para ello se debe escoger la ruta que deben seguir los vehículos que circular por cada vía de acceso. El flujograma mostrado al inicio del capítulo sirve de mucha utilidad para el ingreso de datos, ya que nos refleja los porcentajes que resultan de cada cambio de acceso respecto del volumen de entrada. Se debe tener en cuenta que ciertos vehículos no realizan giros, como el caso de los microbuses en la Av. Villa María del Triunfo.

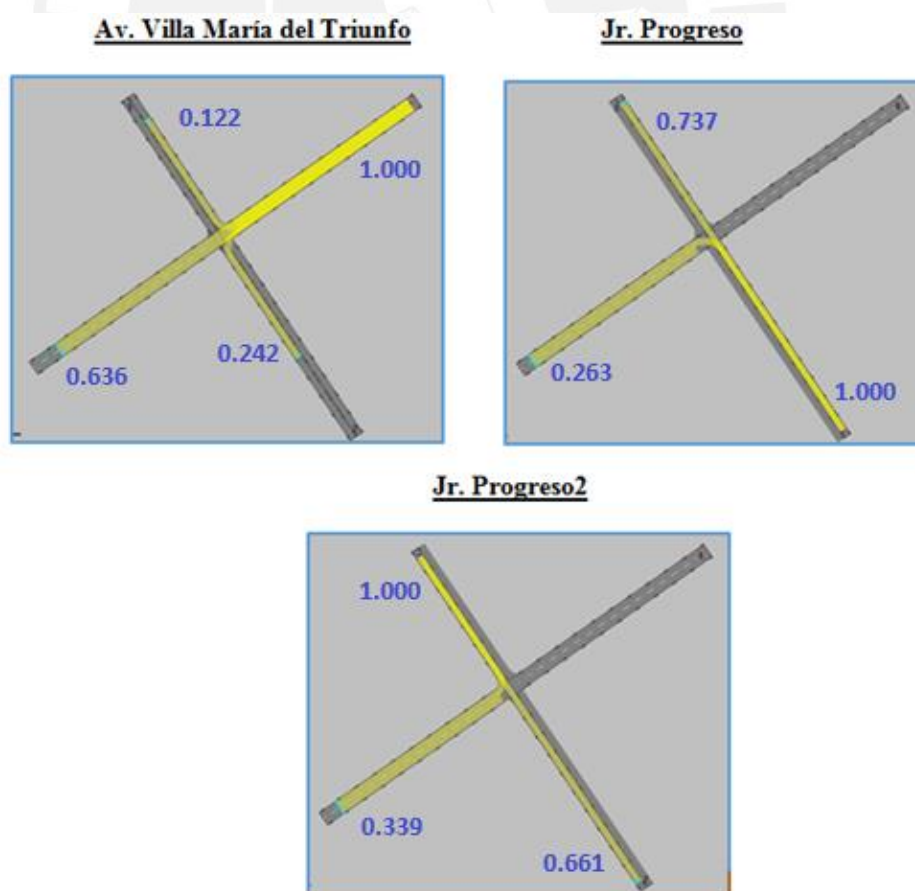
Un detalle importante al momento de seleccionar las rutas es considerar los carriles por los cuales se iniciarán los giros. Para el caso del Jr. Progreso, en sus dos sentidos, no hay ningún inconveniente ya que cada sentido tiene un solo carril, por lo que el giro se realiza por el carril respectivo a cada sentido. Sin embargo, para la Av. Villa María del Triunfo, al tener dos carriles, se pudo observar que cada posible giro era realizado por el carril correspondiente. Es decir, el giro hacia la derecha es realizado a partir del carril derecho y el giro hacia la izquierda, a partir del carril izquierdo.

Se debe recalcar que los flujos relativos son obtenidos a partir de la información presentada en la tabla 3. Por ejemplo, Para el acceso Jr. Progreso, se tiene que el 26.3% de los vehículos giran hacia la Av. Villa María del Triunfo, mientras que el restante 26.3% sigue recto sin giro. Para el acceso 2 se crearon 4 rutas para poder diferenciar el flujo por tipo de vehículos, ya que no todos optaban por las 3 opciones que se presentó en el flujograma. Por ello se creó una ruta solo para combis que giraban hacia el Jr. Progreso; para camiones que se dirigen hacia Jr. Progreso2 y para microbuses, combis y camiones que se dirigen de frente sin giro.

En la figura 28 se puede apreciar las diferentes rutas posibles por cada acceso. Como se puede notar en la imagen, la mayor intensidad de color amarillo marca el acceso por el que se inicia el desplazamiento de los vehículos, mientras que el amarillo menos intenso determina el destino de los vehículos que hacen uso de la vía.

**TABLA 7 – Rutas elegidas por los vehículos de cada acceso. Fuente: Propia**

Acceso	Vía	Destino	Flujo Relativo	tipo de veh
1	Jr. Progreso2	Jr. Progreso2	0.661	todos
		Av. Villa María del Triunfo	0.339	
2	Av. Villa María del Triunfo	Av. Villa María del Triunfo	0.604	automóvil y moto-taxi
		Jr. Progreso	0.132	
		Jr. Progreso2	0.264	
	Av. Villa María del Triunfo	Jr. Progreso	1.000	combis
	Av. Villa María del Triunfo	Jr. Progreso2	1.000	camión
	Av. Villa María del Triunfo	Av. Villa María del Triunfo	1.000	microbús, combi y camión
3	Jr. Progreso	Av. Villa María del Triunfo	0.263	todos
		Jr. Progreso	0.737	

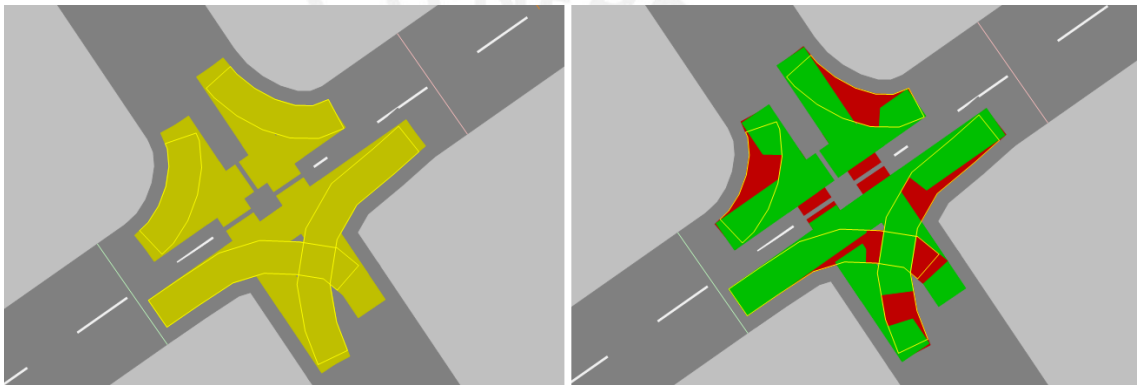


**FIGURA 28 – Rutas de vehículos. Fuente: Propia**



#### 4.2.4. Áreas de Conflicto

Una vez que se tienen las rutas definidas se hace una primera corrida del modelo para observar el comportamiento de los vehículos. Lo que se observa al ver la simulación es que existen cruces entre vehículos que siguen rutas diferentes. Esto en la vida real representa un accidente, por lo cual el modelo debe ser corregido. Para esto se selecciona la opción “Conflict Areas” que nos muestra las zonas en la que se producen estos cruces entre vehículos. Una de las características de este comando es que muestra las zonas de conflicto sin resolver en color amarillo y va cambiando de color de acuerdo a la prioridad que le asignemos. Es decir, el color verde indica que tiene prioridad sobre el rojo. En la figura 29, se observa que existe una gran cantidad de zonas de conflicto que son generadas por los cruces entre los giros de la intersección y a las posibilidades de ir recto sin giro.



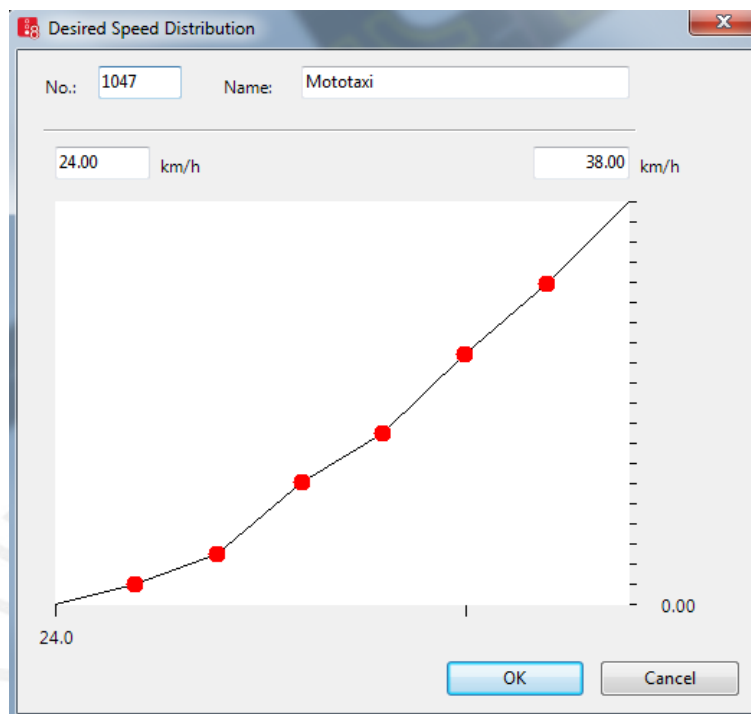
**FIGURA 29 – Áreas de conflicto en la intersección. Fuente: Propia**

La Av. Villa María del Triunfo es una vía principal, por lo que los vehículos que circulan en ella tienen prioridad sobre aquellos que lo hacen en el Jr. Progreso. Al momento de establecer las prioridades en el software, estas fueron asignados a las direcciones 2-1- 2-3 y 2-4. A su vez, los giros de la avenida principal son preferentes respecto de los giros de las otras vías. Sin embargo, las vías secundarias tienen prioridad si ocurre algún giro por parte de la avenida principal.

#### 4.2.5. Comportamiento de la moto-taxi

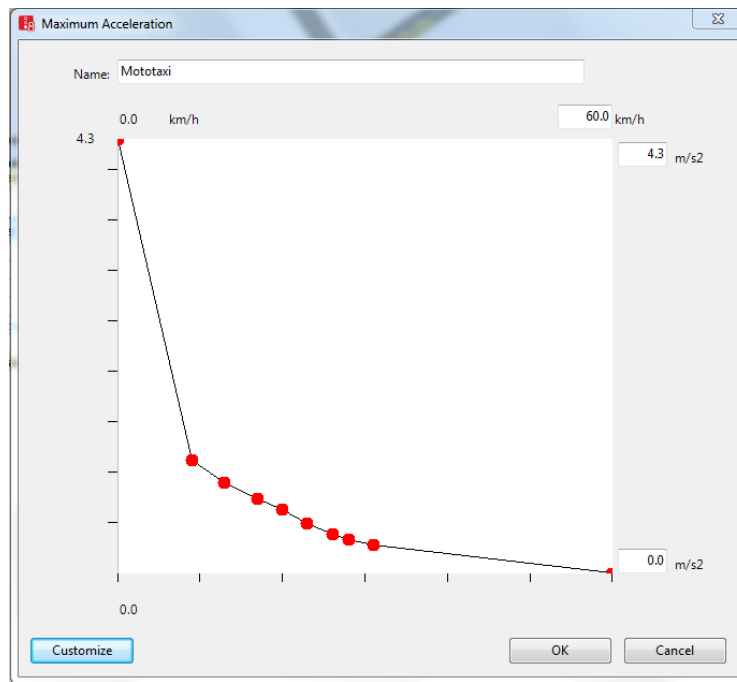
Para poder representar fielmente a las moto-taxis en el software es necesario ingresar las características del comportamiento de estos vehículos. Debido a que VISSIM 8.0 no contempla las características de este tipo de vehículos, se deben crear nuevas distribuciones para cada uno de los campos que definan su comportamiento como la velocidad deseada, las aceleraciones máximas y deseadas y, por último, la desaceleración.

Primero se ingresará la velocidad deseada de las moto-taxis, para lo cual se parte de la figura 26, donde se mostró el histograma elaborado a partir de los datos recolectados. Se crea una nueva distribución y, al editar los valores con dicha información, se obtiene la gráfica mostrada en la figura 30.

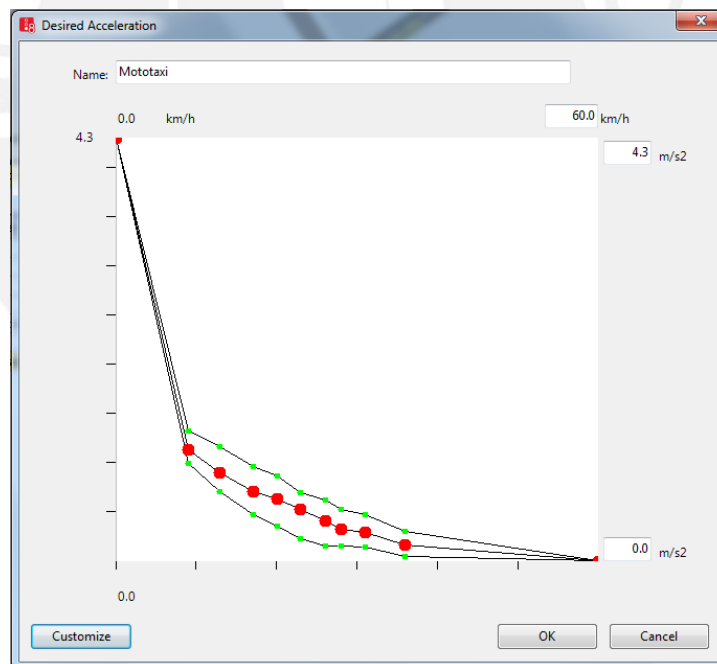


**FIGURA 30 – Velocidad deseada para las moto-taxis. Fuente: Propia**

De manera similar ocurre con la aceleración máxima y deseada. Se debe crear una distribución para poder ingresar los valores obtenidos. Anteriormente se explicó que, para nuestro caso de estudio, ambas aceleraciones serían consideradas iguales. Sin embargo, por un lado, en la figura 31, la aceleración máxima está representada por la curva de tendencia obtenida en el acápite 1.2; por otro lado, en la figura 32, la aceleración deseada está representada por un rango de valores que abarca el conjunto de datos mostrados en el mismo acápite. Se planteó de esta manera para que las moto-taxis no se vean restringidas a tener una aceleración regida solo por la ecuación polinómica que define la curva de tendencia, sino para que adopten su aceleración de manera más realista.



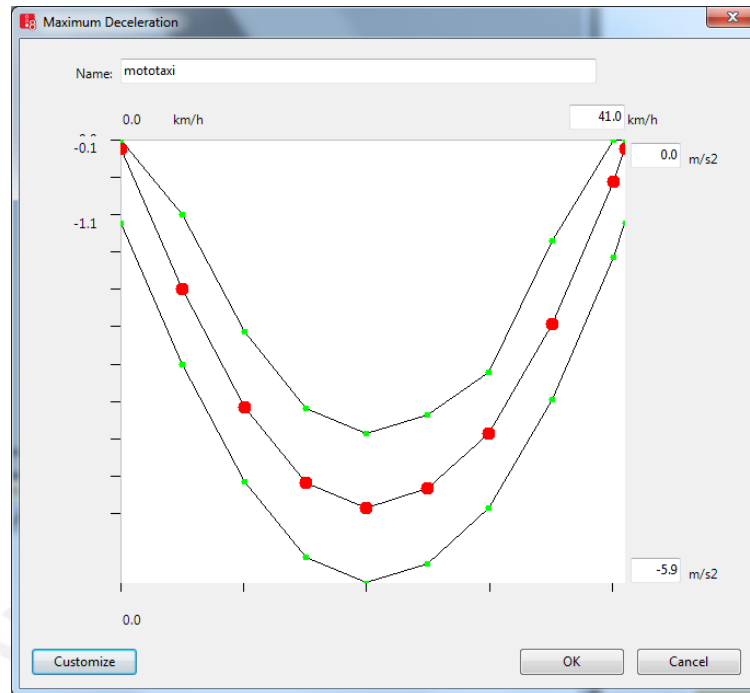
**FIGURA 31 – Máxima aceleración para las moto-taxis. Fuente: Propia**



**FIGURA 32 – Aceleración deseada para las moto-taxis. Fuente: Propia**

Por último, se crea la distribución de la desaceleración máxima. Como se mencionó en el acápite 1.3, se trató de mantener la tendencia de la curva obtenida, y para ubicar los valores se utilizó la ecuación que define la curva de tendencia de la figura 24. En la figura 33 podemos apreciar la gráfica de la desaceleración máxima ingresada a VISSIM. Se puede apreciar que

se asignó un rango de valores para que se mantenga el comportamiento obtenido anteriormente.



**FIGURA 33 – Desaceleración máxima para las moto-taxis. Fuente: Propia**

#### 4.2.6. Velocidades de giro

Al momento de realizar un giro es común que el conductor reduzca la velocidad para poder realizar la maniobra de forma segura sin perder el control del vehículo. En los procesos de micro-simulación es importante representar esta característica ya que, de lo contrario, los vehículos realizarían maniobras temerarias. Aunque en algunas ocasiones esto suele suceder en la realidad, al momento de realizar el modelo se han considerado las velocidades promedio en la que los vehículos realizan los giros. Para lograr reproducir este comportamiento, cada giro en la intersección presenta una reducción de velocidad que se adapta a las velocidades de giro obtenidas del registro fílmico. En la figura 34 se puede apreciar las zonas de velocidad reducida, mientras que en la tabla 8 se puede apreciar las velocidades a las que los vehículos deben hacer los giros para cada uno de los accesos, teniendo como base la orientación anteriormente establecida.



**FIGURA 34 – Zonas de giro. Fuente: Propia**

Los valores que se pueden apreciar en la tabla 8 han sido obtenidos a partir del registro fílmico y fueron redondeados a los números mostrados en la tabla. La diferencia de velocidades entre los valores obtenidos del video y los mostrados en la tabla es mínima, al igual que en los camiones y motos lineales. Por ello, la diferencia entre las velocidades no representa una fuente de error al momento de evaluar los resultados.

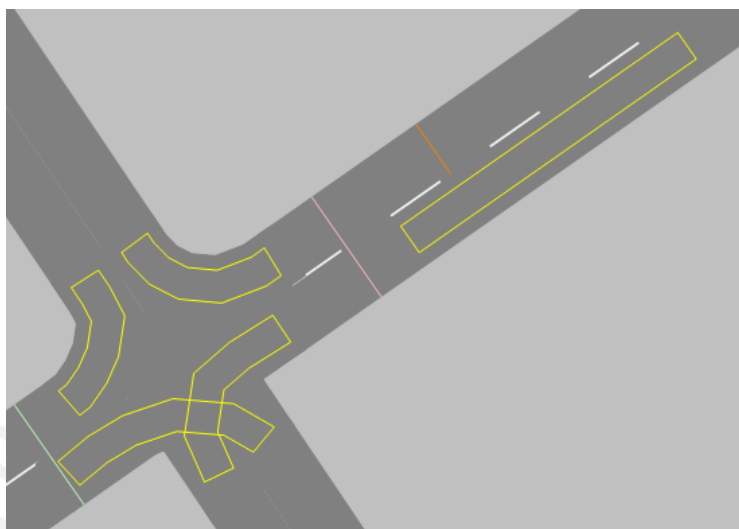
**TABLA 8 – Velocidades en giros dentro de la intersección. Fuente: Propia**

DIRECCIÓN	VELOCIDADES (Km/h)					
	AUTO	MOTO-TAXI	MICRO	COMBI	CAMION	MOTO LINEAL
3 - 4	20	15	15	15	-	15
2 - 1	20	15	-	15	-	-
1 - 4	20	15	15	15	-	15
2 - 3	20	15	-	-	15	-

Adicionalmente, se colocó un reductor de velocidad en la avenida principal, antes de llegar a la intersección, para simular la frenada previa que se realiza usualmente en una intersección. En la tabla 9 se pueden apreciar las velocidades a las que deben circular los vehículos que circulan por la zona de reducción de velocidad. Como se aprecia en la figura 35, el reductor solo fue colocado en el carril izquierdo debido a la señal de pare que se encuentra en el carril derecho, que simula el paradero informal existente.

**TABLA 9 – Velocidades en la avenida principal. Fuente: Propia**

DIRECCIÓN	VELOCIDADES (Km/h)				
	AUTO	MOTO-TAXI	MICRO	COMBI	CAMION
2 - 4	40	30	30	30	30



**FIGURA 35 – Reductores de velocidad en vía principal. Fuente: Propia**

#### **4.2.7. Comportamiento de los conductores**

En esta etapa se define el comportamiento de los conductores que manejan las moto-taxis y demás vehículos presentes en la intersección. Debido a que este tipo de vehículos prima en la zona de estudio y, para este caso particular, el comportamiento de los demás vehículos es similar al de las moto-taxis, se utilizará el mismo comportamiento para toda la red. Por ello, se utilizó el modelo de seguimiento vehicular de Wiedemann propuesto en 1974, descrito en el capítulo 2. En el software, se tiene la opción de elegir el tipo de seguimiento a utilizar por lo que se escoge la opción “Wiedemman 74”.

Se creó un nuevo comportamiento de conductores al que se denominó “mototaxis”, como se puede apreciar en la figura 37. Para poder definir el modelo de seguimiento se estableció un valor de 20 cm como la distancia entre vehículos detenidos, debido a que los conductores de estos vehículos tienden a frenar recién al acercarse demasiado al vehículo posterior cuando este se detiene, por lo que quedan separados una distancia mínima. Como se puede apreciar en la figura 36, esta distancia fue calculada en campo, mediante la recolección de varios valores. Sin embargo, el valor mostrado en la figura 37 es el promedio obtenido.





**FIGURA 36 – Medición de distancia entre dos moto-taxis detenidos. Fuente: Propia**

Luego, se redujo a 2 el factor multiplicativo de distancia segura (3 por defecto), ya que los conductores de este tipo de vehículo suelen ser agresivo y pareciera no importarles las consecuencias de sus maniobras intempestivas. En la figura 38 se puede apreciar el modelo de seguimiento propuesto para nuestro caso.

**FIGURA 37 – Parámetros de seguimiento vehicular para moto-taxis. Fuente: Propia**

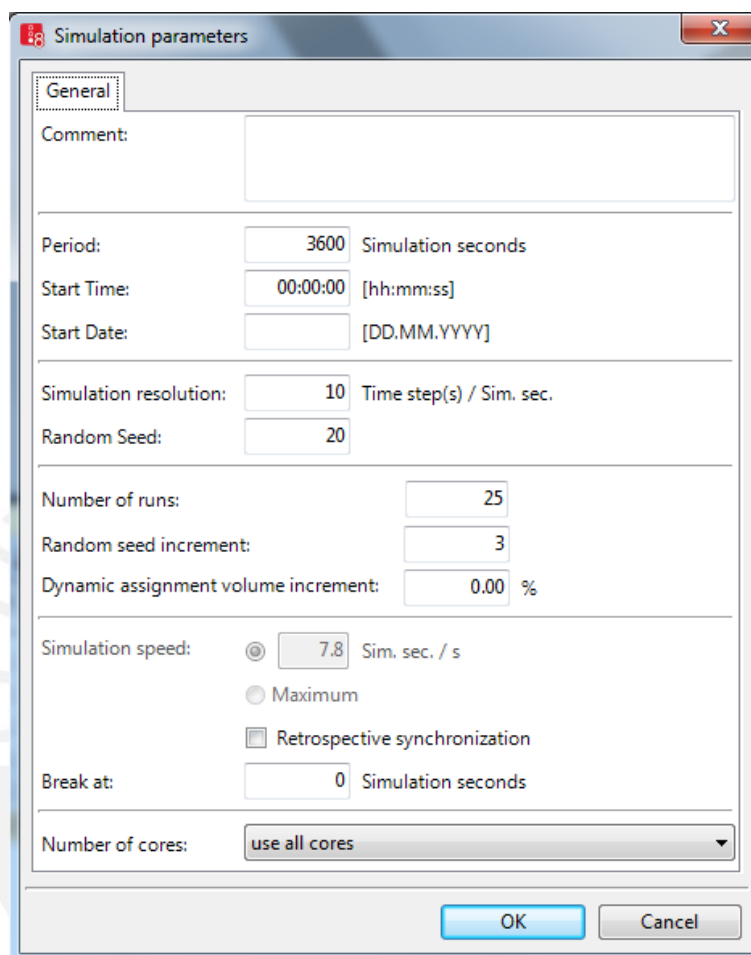
Para definir el comportamiento de las moto-taxis en el cambio de carril se actualizaron los valores de la figura 38 con los correspondientes a este tipo de vehículo, para el cual la desaceleración máxima es de  $-5.00$  m/s<sup>2</sup>. Además, debido al comportamiento agresivo de los conductores, y a que las dimensiones del vehículo se lo permiten, se redujo a 10 segundos el tiempo de espera para realizar el cambio de carril. De esta manera, se fuerza a las moto-taxis a ingresar agresivamente a otro carril. Por último, se redujo la distancia frontal entre vehículos a 20 cm, esto debido a que las moto-taxis suelen mantener una distancia mínima al momento de acercarse a otros vehículos.

**FIGURA 38 – Cambio de carril para moto-taxis. Fuente: Propia**

#### 4.2.8. Parámetros de simulación

Antes de correr por primera vez el software es necesario adaptar los parámetros de simulación al caso de estudio. Lo primero que se debe verificar es que se tenga 1 hora de simulación para este proyecto, con periodos de actualización de intervalos fijos de 0.1 segundos.

Luego, se elige el número de corridas. Para un primer análisis se optó por tener 25 muestras para, posteriormente, determinar si es una cantidad adecuada. De manera aleatoria se elige el número de semilla, por defecto se encontraba en 20 y se tomó un incremento de 3 para cada corrida. En la figura 39 se puede apreciar los parámetros ingresados en el software.



**FIGURA 39 – Parámetros de simulación. Fuente: Propia**

#### 4.2.9. Número de Corridas

Una vez que se tiene construido el modelo base, se procede a correr la simulación para obtener los primeros resultados mostrados en la tabla 9. Como se mencionó en el acápite anterior, se eligieron 25 corridas para obtener una mayor precisión, normalmente se recomienda realizar 15 corridas al software, pero se optó por un número mayor para tener la certeza de que la cantidad sea mayor que la mínima.

El promedio y la desviación estándar de los tiempos hallados serán de ayuda para verificar que el número de corridas fue, efectivamente, el adecuado para el caso de estudio. Se puede apreciar, que, para la primera corrida, un vehículo cualquiera, en promedio, se demora 4.44 segundos en recorrer los 18 metros establecidos para medir este parámetro de eficiencia.

**TABLA 10 – Tiempos de viaje de primera corrida del software. Fuente: Propia**

#corrida	Tiempo de viaje
1	4.76
2	5.65
3	3.95
4	4.00
5	4.15
6	4.34
7	4.06
8	3.97
9	4.31
10	4.80
11	4.57
12	4.74
13	4.28
14	4.48
15	4.04
16	4.11
17	4.67
18	3.97
19	4.35
20	4.25
21	4.69
22	4.78
23	4.82
24	4.04
25	5.30
<b>promedio</b>	<b>4.44</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>0.44</b>

Como se mencionó anteriormente, es necesario comprobar el número mínimo de corridas necesarias para nuestro modelo. Se realizó un primer análisis para un número de corridas de 10. Como se observa en la tabla 11, se exige un número mínimo de corridas de 25. Realizando el mismo procedimiento, pero para un número de corridas de 14, se observa que se exige una corrida mínima de 24, por lo que la condición aún no se cumple. Luego, al tomar un número de corridas de 23, se cumple con la condición de corridas mínimas. Por lo

tanto, se ha asumido el número de corridas igual a 25, que verifica que el valor asumido inicialmente era correcto.

**TABLA 11 – Número mínimo de corridas. Fuente: Propia**

Indicadores	Av. Vila Maria
	E-O
Media	4.44
Desviación Estándar	0.44
C	0.4

<b>n</b>	<b>10</b>	<b>14</b>	<b>23</b>
<b>n-1</b>	<b>9</b>	<b>13</b>	<b>22</b>
<b>(alpha/2)</b>	0.025	0.025	0.025
<b>t</b>	2.2622	2.1604	2.0739
<b>corrida mínima</b>	25	24	23

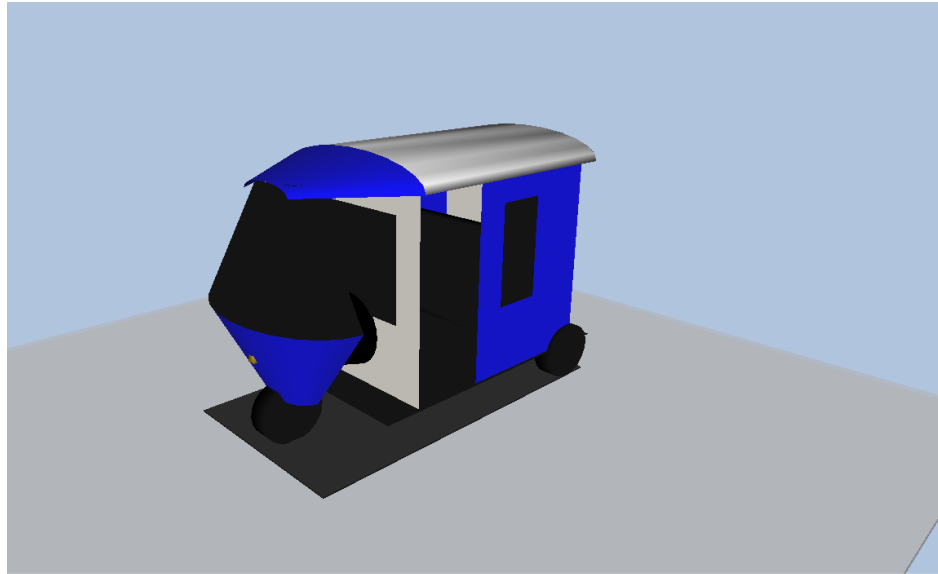
### 4.3. Revisión de errores

La etapa de revisión de errores está basada en la observación de la animación del modelo y la verificación de los valores de entrada. Al momento de revisar los valores de entrada se detectó un error grave en las rutas que tomaban ciertos vehículos que ingresaban a la intersección por el acceso 2: Los microbuses y combis realizaban giros hacia el J. progreso, en cualquiera de sus direcciones; sin embargo, en la realidad esto no está permitido. Para solucionar este error se creó una nueva composición vehicular, un nuevo ingreso de volúmenes a la vía que contemple estos vehículos y luego, se adaptaron las rutas que tomaban los vehículos. De esta manera se solucionó este inconveniente, que de no haber sido detectado, pudo afectar notablemente los resultados de la simulación.

Luego se procedió a visualizar la animación del modelo, donde se pudo apreciar que las prioridades establecidas generaban cruce de vehículos, por lo que se debió reasignar las prioridades para evitar este tipo de conflicto. Finalmente, se pudo observar que los vehículos entraban a la intersección demasiado rápido por el acceso 2, por lo que se agregó un reductor de velocidad que simule la acción de frenado.

La imagen de la moto-taxi mostrada en la figura 40 es tratada como un bloque de particulares dimensiones, lo cual podría impedir una de nuestras hipótesis planteadas anteriormente (viaje de dos moto-taxis por un mismo carril). Por ello, se corrigió el modelo 2D/3D ingresado al software. A partir de esta corrección en las dimensiones del modelo de

acuerdo a los valores mostrados en la figura 16, se puede evaluar correctamente la hipótesis planteada en un inicio.



**FIGURA 40 – Modelo 3D de las moto-taxis. Fuente: Propia**

#### **4.4. Calibración**

En esta etapa de la micro-simulación, se puede decir que el modelo ya está construido en su totalidad; sin embargo, aún no podemos afirmar con certeza que se está reflejando la realidad en el software. Para lograr este acometido, se debe realizar una prueba no paramétrica (Randomization Test), la cual trabaja con las pruebas de hipótesis nula y alternativa.

Esta consiste en comparar los datos obtenidos en el software, estadísticamente, con los valores reales obtenidos a partir del registro fílmico. Los valores a comparar son los parámetros de eficiencia que se pueden obtener dentro de la intersección. Para nuestro caso de estudio, se decidió calibrar en base a los tiempos de viaje que demoran los vehículos en cruzar la intersección si se conduce por la Av. Villa María del Triunfo. En la tabla 12 se pueden apreciar los tiempos obtenidos tanto del video como del software.



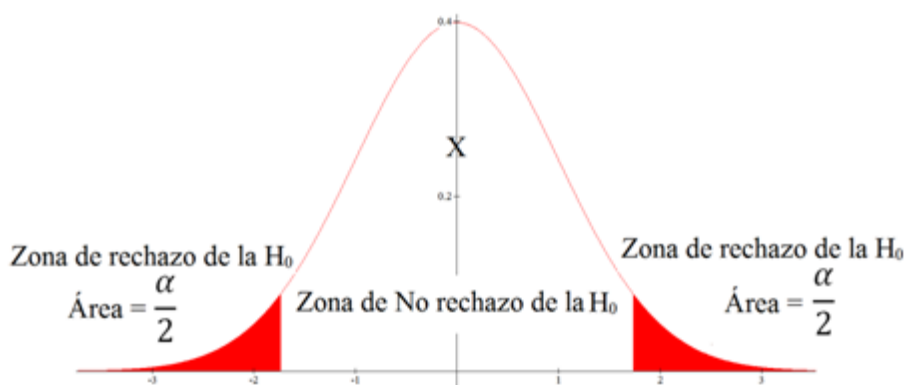
**TABLA 12 – Tiempos de viaje obtenidos para calibración. Fuente: Propia**

VIDEO		VISSIM
4.60	4.70	4.55
4.80	4.50	5.34
4.40	4.20	4.53
4.40	4.60	4.41
4.60	4.70	4.48
5.20	4.80	5.05
4.80	5.10	4.59
4.50	4.70	4.69
5.20	4.30	4.73
4.30	5.30	5.29
4.50	5.20	5.19
4.40	4.50	5.61
4.70	4.30	4.60
4.20	4.80	4.84
4.80	5.30	4.75
4.50	5.20	4.40
4.60	4.20	4.47
4.60	5.20	4.56
4.30	5.30	5.24
5.00	4.20	4.32
4.90	4.60	5.13
4.40	4.90	5.38
5.10	4.50	4.39
4.90	4.30	4.16
4.60	4.60	5.55

Previo a la prueba no paramétrica, es necesario definir la hipótesis nula ( $H_0$ ) y alternativa ( $H_1$ ), las cuales asume las siguientes condiciones:

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$$

$$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$$



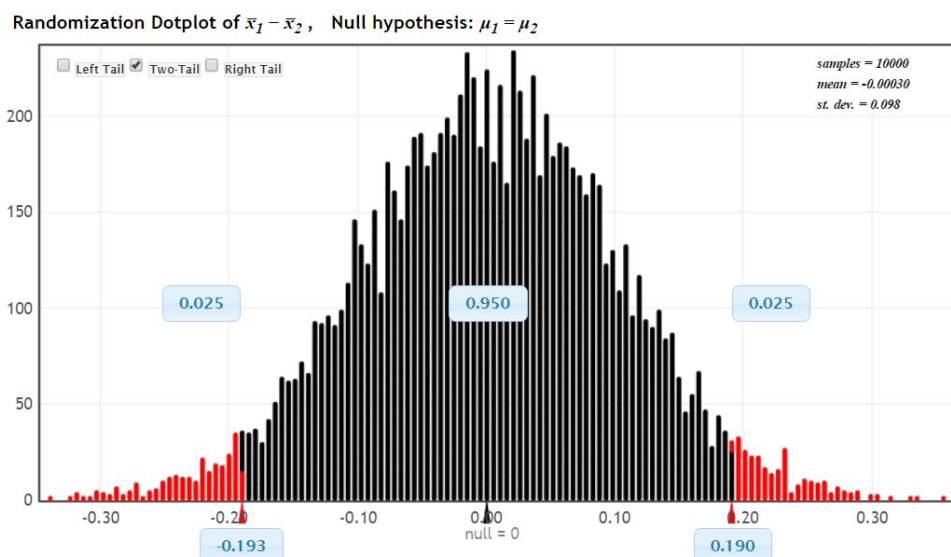
**FIGURA 41 – Distribución normal.**

Estas condiciones pueden ser representadas mediante una distribución normal como lo muestra la figura 41, en la cual el rechazo de la hipótesis  $H_0$  se encuentra representado por las colas de color rojo. Cuando se tiene una región de aceptación del 95%, las dos colas presentarán una región de rechazo de un 2.5% ( $\alpha/2$ ) cada una.

Para que se cumpla la condición  $H_0$ , tanto los valores obtenidos del video como los resultados del software deberían ser iguales. Sin embargo, de la tabla 8 podemos afirmar que no es así, por lo que se toman conjuntos aleatorios de los datos y se procede a determinar la cercanía de medias de este conjunto elegido.

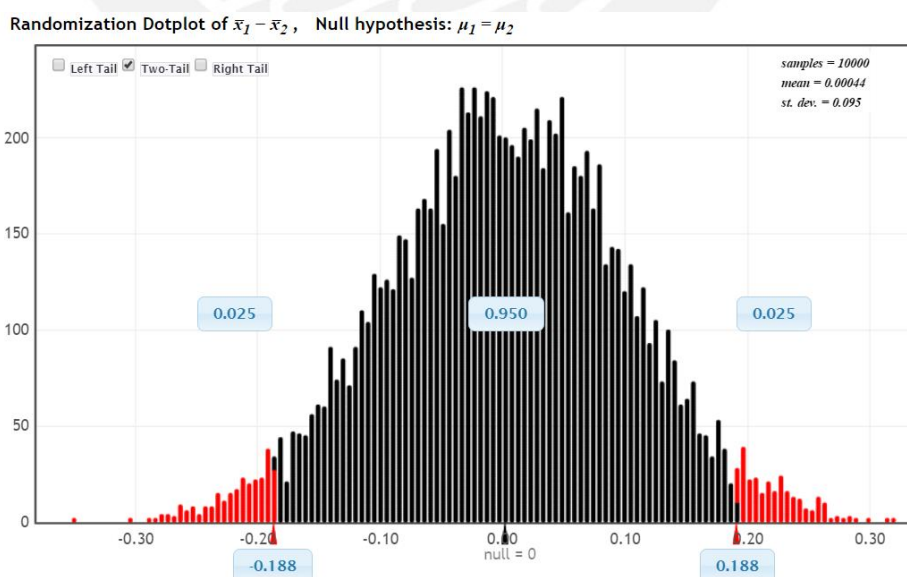
Para poder realizar este ejercicio, haremos uso de la herramienta StatKey, que nos permite obtener los resultados de 10000 permutaciones. Para el caso en estudio se utilizaron 50 muestras recolectadas del registro fílmico para la calibración y 50 recolectadas en campo para la validación. El objeto de tener más muestras recolectadas para ambos ejercicios es de obtener más información de lo que realmente sucede en la intersección. Los valores obtenidos del software Vissim 8.0 son los resultados promedio de cada corrida que se hace al modelo. Por lo tanto, se desea comparar estos resultados con valores más reales.

Para la calibración, la diferencia de medias del conjunto original es igual a 0.03, bastante próximo a la hipótesis nula planteada al inicio. De la figura 42 se puede apreciar que este valor se encuentra dentro de la zona de 95% de confianza, por lo que podemos decir con certeza que el modelo se encuentra calibrado.



**FIGURA 42 – Calibración del modelo mediante StatKey. Fuente: Propia**

El procedimiento para validar el modelo es exactamente el mismo al de la calibración. Sin embargo, los datos a comparar son diferentes. En este caso se usan tiempos de viaje recolectados en un momento distinto a los usados para la calibración. Para ello, se tuvo que hacer un conteo en campo y obtener nuevos valores. En la tabla 13 se pueden apreciar los resultados de campo y del software. Luego, estos son ingresados a la herramienta StatKey, de donde se obtiene la gráfica mostrada en la figura 43. La diferencia de medias de la muestra original es de 0.06 y se ubica dentro del rango de confianza deseado, por lo que se puede afirmar que el modelo esta validado.



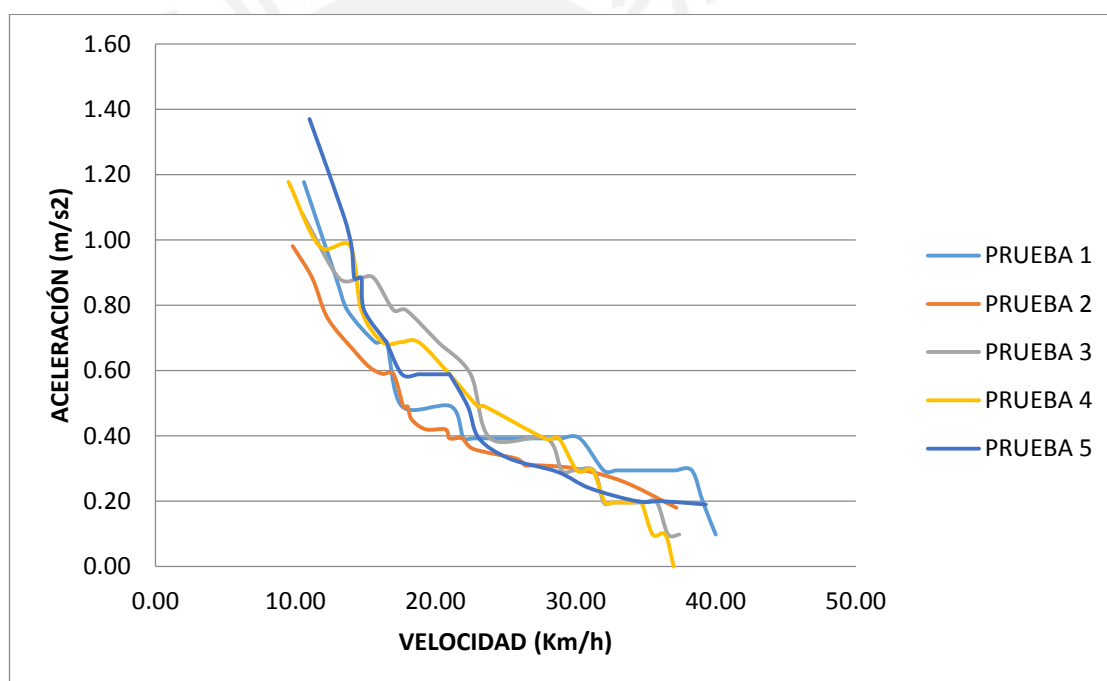
**FIGURA 43 – Validación del modelo mediante StaKey. Fuente: Propia**

**TABLA 13 – Tiempos de viaje obtenidos para validación. Fuente: Propia**

CAMPO		VISSIM
5.00	4.30	4.55
4.50	4.70	5.34
4.10	4.70	4.53
3.90	4.30	4.41
4.40	4.90	4.48
4.10	4.30	5.05
4.50	4.70	4.59
4.30	4.50	4.69
4.00	4.60	4.73
4.30	4.20	5.29
3.90	4.40	5.19
4.80	4.80	5.61
4.70	5.10	4.60
4.20	4.60	4.84
5.00	4.40	4.75
4.00	4.50	4.40
4.30	4.70	4.47
5.20	4.50	4.56
4.30	4.90	5.24
4.80	4.60	4.32
4.60	5.40	5.13
3.90	4.50	5.38
5.00	4.70	4.39
3.80	4.50	4.16
4.20	4.60	5.55

## CAPITULO 5: RESULTADOS

En cuanto al comportamiento operativo de las moto-taxis, podemos apreciar una tendencia similar a las que presentan los demás vehículos, debido a que son impulsados por motores que consumen gasolina. De esta manera, para iniciar el movimiento se requiere cierta aceleración. Luego, cuando el vehículo ya está en movimiento, para aumentar las velocidades se requiere cada vez menos aceleración, y por ende un menor consumo de combustible. En la figura 44 podemos apreciar este comportamiento obtenido mediante el registro de las velocidades y aceleraciones obtenidas a partir de la circulación de moto-taxis. En total se realizaron las pruebas en 5 moto-taxis distintos con conductores diferentes. Se puede apreciar que las 5 pruebas muestran una tendencia similar entre ellas, estos datos fueron procesados.



**FIGURA 44 – Cuadro de velocidades y aceleraciones. Fuente: Propia**

Luego de haber calibrado y validado el modelo, se puede ingresar a la sección de listas y ver los resultados generales que proporciona el software. Así, se sabe que a la intersección ingresó un promedio de 1572 vehículos en total. Este valor no coincide con la cantidad total de vehículos contabilizados, y esto se debe a que los vehículos restantes circulan en el modelo durante los primeros 600 segundos de estabilización. Además, se obtiene la velocidad promedio registrada en la intersección y las demoras producidas.

En la tabla 14 se pueden apreciar las velocidades promedio registradas para cada una de las corridas del software. De esta manera, se tiene un promedio global de 19.29 km/h en la

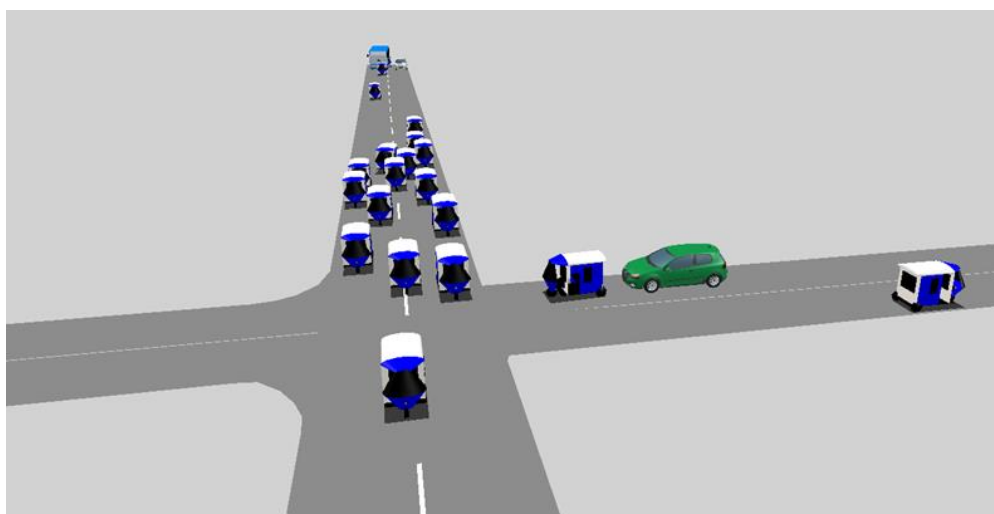
intersección. Similar sucede con las demoras presentes en el modelo, que muestra un promedio de 14.87 segundos producidos, en su mayoría, por los tiempos de espera que se generan para cruzar la intersección.

**TABLA 14 – Resultados obtenidos de la simulación. Fuente: Propia**

# Corrida	Velocidad	Demoras	Ingreso de veh.
1	18.56	16.10	1563
2	16.34	20.86	1568
3	20.63	12.48	1558
4	19.68	13.90	1546
5	18.96	15.42	1554
6	19.33	14.68	1570
7	20.38	12.83	1577
8	21.14	11.73	1562
9	19.98	13.49	1569
10	18.42	16.21	1572
11	19.68	13.94	1592
12	17.46	18.48	1553
13	18.97	15.22	1572
14	19.83	13.74	1598
15	18.79	15.56	1587
16	19.79	13.86	1559
17	20.22	13.35	1580
18	19.50	14.42	1580
19	20.20	13.16	1571
20	19.20	14.91	1559
21	19.42	14.33	1597
22	18.77	15.73	1594
23	18.61	16.05	1576
24	21.49	11.21	1559
25	16.83	20.05	1581
<b>Promedio</b>	<b>19.29</b>	<b>14.87</b>	<b>1572</b>
<b>Des. Est.</b>	<b>1.21</b>	<b>2.30</b>	<b>14</b>

Si bien estos resultados han sido obtenidos a partir del software, no pueden ser objeto de comparación respecto de la realidad debido a que no se tomaron sus valores análogos ya que no forma parte del alcance del presente estudio. Por lo tanto, estos resultados se toman a manera de guía o referencia de lo que está sucediendo en la intersección modelada.

Al momento de revisar la simulación en 3D se pudo apreciar que el comportamiento de las moto-taxis es tal cual se puede ver en la realidad. En la figura 45 podemos apreciar que estos vehículos no mantienen un orden armonioso al momento de trasladarse de un punto a otro. Además, se puede ver que, debido al comportamiento asignado, se genera el movimiento lateral esperado y se pueden ver más de un vehículo ocupando la misma sección de la vía.



**FIGURA 45 – Modelo 3D del comportamiento de las moto-taxis. Fuente: Propia**



## CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del presente estudio se obtuvieron una serie de conclusiones y recomendaciones que serán presentadas en este capítulo. De la misma manera, se dará respuesta a las hipótesis planteadas al inicio del documento.

### 6.1 Conclusiones

A partir de la primera hipótesis se puede concluir que las moto-taxis, al tratarse de un vehículo no convencional y que presenta un comportamiento particular y diferente de los demás tipos de vehículos, pueden ser representadas en el software Vissim 8.0 en tanto se tenga disponible la información de su comportamiento mecánico y las características del comportamiento de los conductores de la zona en estudio. Se puede afirmar esto con certeza ya que el modelo fue calibrado con un 95% de confianza y, visualmente, refleja las características propias del área en cuestión presentes en el video registrado.

Un objetivo logrado a lo largo de esta investigación fue incorporar el comportamiento mecánico de las moto-taxis. Esto se logró a partir de las gráficas de aceleración y desaceleración obtenidas, que fueron ajustadas mediante curvas de regresión que reflejan fielmente los datos recolectados. Se puede hacer esta afirmación ya que los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) son cercanos a 1. Por lo tanto, el comportamiento mecánico de las moto-taxis es correctamente simulado en el software y puede ser utilizado a futuro en propuestas de rediseño o investigaciones, no solo de la zona de estudio de la presente investigación, sino en cualquier lugar que incluya el modelo de moto-taxi empleado.

Para analizar el modelo se requirió tener resultados estadísticamente satisfactorios para poder afirmar nuestras hipótesis. Es por eso que representar todos los eventos presentes en la filmación resulta innecesario, pero se debe tener en cuenta los datos indispensables para lograr un comportamiento fiel a la realidad. Por ejemplo, no fue necesario incorporar a las personas dentro de nuestra área de estudio ya que presentaban flujos muy reducidos y su interacción con los vehículos no afectaba directamente los resultados. De manera similar, representar exactamente la distribución de los tiempos de paradas presentes en el paradero informal no influye sustancialmente en los resultados debido a que se obtuvieron tiempos muy cercanos entre sí.

En las hipótesis iniciales se planteó evaluar la posibilidad de representar dos moto-taxis en un solo carril. Este comportamiento es común en las calles de Lima, ya que las dimensiones de este tipo de vehículos y, muchas veces, de la calzada permiten este comportamiento. Se

debe mencionar que este comportamiento no es restringido a un solo carril de la vía, por lo que se pudo apreciar hasta 3 moto-taxis viajando juntos a lo ancho de la Av. Villa María del Triunfo. A partir de esto, se puede concluir que este comportamiento depende directamente de las dimensiones del modelo que se asigne a cada vehículo, del ancho de la calzada y del comportamiento lateral asignado. Es importante actualizar los parámetros de comportamiento lateral para que se ajusten al comportamiento real de este tipo de vehículos, para esto se deben realizar inspecciones en campo que permitan ajustar valores aproximados

Finalmente, en las filmaciones, se observa a las moto-taxis con libertad para moverse a lo largo de ambas calzadas, cambiando de carril cuando es necesario o actuando en modo de vehículo perseguidor. Por ello, el otorgar a las moto-taxis un comportamiento tanto de seguimiento como lateral nos pudo brindar valores muy similares a los obtenidos en campo con una desviación estándar de 0.086, lo cual comprueba que ambos comportamientos fueron ideales para nuestro caso de estudio.

## **6.2 Recomendaciones**

Es importante mencionar que, si bien las características mecánicas pueden ser aplicables a otras zonas de estudio, las velocidades obtenidas, presentadas mediante el histograma de velocidades, y el comportamiento de los conductores especificados en el presente estudio, no pueden ser asumidos como constantes en cuanto al desempeño general de este tipo de vehículos. Por lo tanto, se recomienda, si se desea hacer uso de la información y resultados mostrados en esta investigación, tener en consideración que las velocidades y comportamientos son variantes de acuerdo a la zona de estudio y deben ser hallados nuevamente.

Se debe destacar la importancia que toman los valores ingresados en el comportamiento de los conductores, independientemente del tipo de vehículos. A lo largo del desarrollo del modelo, se pudo observar la influencia que tiene en los parámetros de eficiencia. Por ello se recomienda ampliar los alcances del presente estudio, para obtener un comparativo en cuanto al desempeño del modelo frente a diferentes condiciones ajustables del modelo de seguimiento vehicular. Basados en el mismo principio, resultaría interesante establecer una comparación entre el comportamiento estándar propuesto por el software Vissim 8.0 para vehículos urbanos y el propuesto en esta tesis para las moto-taxis. Sin embargo, debido a la naturaleza variable de estos de acuerdo a la zona de estudio, no se podrían generalizar los resultados a obtener.

En términos generales, se puede decir que el procedimiento seguido para poder representar fielmente a las moto-taxis puede ser aplicado para cualquier otro tipo de vehículo que no esté incluido en el software Vissim 8.0, ya sean patines, bicicletas motorizadas, patinetas y demás. Esta información en conjunto podría dar un mejor resultado si es aplicada a un estudio de vida pública, que permita analizar la interacción de los peatones con los demás vehículos que los rodean.



## REFERENCIAS

- Akshay, et al. (2012). Sustainable Urban Transport in India: Role of the Auto-rickshaw Sector. Washington, USA.
- Arif Mehmood, et al. (2002). *Application of System Dynamics in Car-following Models*. Waterloo.
- Autodisa. (2012). *Autodisa*. Retrieved Noviembre 10, 2015, from <http://autodisa.pe/torito/?p=12>
- Cal y Mayor, et al. (1994). *Ingenieria de Tráfico* (7 ed.). Mexico, D.F.
- Coss, R. (1994). *Simulacion, un enfoque práctico*.
- Diaz, et al. (2011). Un transporte urbano no convencional en África Subsahariana: el mototaxi. VIAL.
- Federal Highway Administration. (2004). *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software*. Georgetown.
- Fernandez, R. (2008). *Elementos de la Teoría del Trafico Vehicular*. Santiago de Chile.
- Fernández, R. (2011). *Elementos de la teoría del tráfico vehicular*. Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Johansson, F. (2013). *Microscopic Modeling and Simulation of Pedestrian Traffic*. Norrkoping.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2003). Reglamento Nacional de Vehiculos. Lima.
- Minitab Inc. (2015). *Soporte de Minitab*. Retrieved Noviembre 13, 2015, from <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/hypothesis-tests/basics/what-is-a-critical-value/>
- Nagel, et al. (1992). *A cellular automaton model for freeway traffic*. Koln.
- Ni, D. (2016). *Traffic Flow Theory: Characteristics, Experimental Methods, and Numerical Techniques*. Oxford: Elsevier Inc.
- Panwai, et al. (2005). *Comparative Evaluation of Microscopic Car-Following Behavior*.
- Radelat, G. (2003). *Principios de Ingenieria de Transito*. Institute of Transportation Engineers.
- Rahman, M., D'Este, G., & Bunker, J. (2009). Non-motorized public transport development: present scenario and future approach in developing cities. *Queensland University of Technology*.
- Real Academia Española. (2015, Setiembre 29). *Real Academia Española*. Retrieved from <http://lema.rae.es/drae/?val=simulaci%C3%B3n>
- Rickert, et al. (2008). *Two Lane Traffic Simulations using Cellular Automate*. Koln.
- Romero, G. (2012, Marzo 25). *Taller de Factores Humanos*. Retrieved Marzo 21, 2016, from <http://gladys-romero.blogspot.pe/2012/03/investigacion.html>

The Institution of Highways & Transportation. (2006). *Traffic Micro-Simulation Modelling*. Endsleigh Street.

The Institution of Highways & Transportation. (n.d.). *Traffic m*.

Transportation Research Board. (2000). *Highway Capacity Manual*.

Universidad de Murcia. (n.d.).

Universidad de Murcia. (2015). *Laboratorio de Modelizacion*. Retrieved Noviembre 12, 2015, from <http://www.um.es/fem/PersonalWiki/pmwiki.php/EsModelling/IntroClasses>

Virginia Department of Transportation. (2013). *Traffic Operation Analysis Tool Guidebook Version 1.1*. Virginia.

WebFinance. (2015). *Business Dictionary*. Retrieved Noviembre 03, 2015, from <http://www.businessdictionary.com/definition/deterministic-model.html>

Wood, S. (2012). *Traffic Microsimulation-dispelling the myths*. Hampshire: Imtech.

